colecção

SABER

ALBERT EINSTEIN

Por LEOPOLD INFELD

Publicações
EUROPA-AMÉRICA

colecção SABER

«O saber não ocupa lugar»

A *Colecção SABER* é no seu conjunto uma pequena enciclopédia dos conhecimentos actuais. É uma colecção que já figura em todas as bibliotecas e anda nas mãos de toda a gente. É para muitas pessoas a escola que não puderam frequentar e para muitas outras a ocupação útil e agradável das horas de ócio. A *Colecção SABER* publica livros para todos; interessa ao estudante e ao professor, ao especialista que deseja conhecer o que se passa nos outros ramos do conhecimento e ao autodidacta ansioso de aumentar a sua cultura. Nesta colecção incluem-se originais portugueses e traduções do espanhol, do inglês e do francês. Os primeiros volumes foram traduzidos da *Colecção QUE SAIS-JE?* por acordo estabelecido entre **PUBLICAÇÕES EUROPA-AMÉRICA** e **PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE.**

Cada volume: 15$00

Secções da Colecção SABER

I — Filosofia, Psicologia, Moral.
II — Religiões, Mitos, Crenças.
III — Ciências jurídicas, económicas e sociais.
IV — Cultura literária e artística.
V — Ciências puras.
VI — Ciências aplicadas.
VII — História, Geografia.
VIII — Desportos, Educação Física, Jogos.
IX — Biografias.
X — Textos clássicos.
XI — Problemas nacionais.
XII — Problemas internacionais.

Este volume pertence às Secções V — *Ciências Puras,* e IX — *Biografias.*

ALBERT EINSTEIN

Colecção **SABER**
«O SABER NÃO OCUPA LUGAR»

ALBERT EINSTEIN

A SUA OBRA E A SUA INFLUÊNCIA NO MUNDO CONTEMPORÂNEO

pelo

Prof. LEOPOLD INFELD

PUBLICAÇÕES EUROPA-AMÉRICA

LISBOA

Esta obra foi originalmente publicada em inglês com o título:

ALBERT EINSTEIN. His work and its influence on our world

Versão portuguesa de Fernando de Macedo

para

PUBLICAÇÕES EUROPA-AMÉRICA

Todos os direitos estão reservados para a língua portuguesa (Portugal e Brasil)

ADVERTÊNCIA AO LEITOR

O Prof. L. Infeld, nascido em Wroclaw, em 1898, estudou Física nas Universidades de Cracóvia, Berlim e Cambridge. Em 1936 tornou-se o colaborador de Einstein em Princeton, nos Estados Unidos. Escreveu com o grande sábio um livro que foi traduzido em todo o mundo: *A Evolução da Física*. Em 1949 Infeld, que era professor na Universidade de Toronto, visitou a sua pátria e resolveu fixar-se ali definitivamente. Dirige presentemente a secção teórica do Instituto de Física de Varsóvia. Publicou cerca de sessenta obras científicas e cinco romances.

No seu livro sobre Einstein, Infeld soube expor de forma compreensível a todos a perturbação que o criador da teoria da relatividade provocou na nossa concepção do mundo físico. Ao contrário da opinião corrente, Infeld crê que, mesmo sem conhecimentos especiais de matemática ou de física, é possível adquirir uma noção essencial da física moderna e dela extrair uma satisfação profunda. Estabelece uma comparação com a música: da mesma forma que não são necessários conhecimentos técnicos para apreciar uma sinfonia de Beethoven, também sem conhecimento especial da técnica matemática se podem compreender as ideias fundamentais da teoria da relatividade.

Todo o livro está escrito numa linguagem ao mesmo tempo simples e florida, impregnada muitas vezes de um humor raro. Infeld soube colocar-se ao nível do não iniciado e conversar familiarmente com

ele sobre a teoria da relatividade, sobre a posição de Einstein perante a *teoria dos quantos*, sobre as teorias modernas da estrutura do universo. Trata ainda de forma impressionante duma teoria da gravitação em que Einstein procura estabelecer uma base comum para a gravidade e os fenómenos electromagnéticos.

CAPÍTULO I

Vencendo preconceitos

Em 1955 a teoria da relatividade completou meio século de existência. Hoje os físicos consideram-na como uma teoria clássica, e os tempos em que era contestada e atacada parecem distantes e passados para sempre. No entanto, ainda em 1921 o famoso físico Von Laue escrevia no prefácio do seu livro:

> Hoje a teoria da relatividade é muito admirada e muito atacada. Os que gritam mais alto, em ambos os lados, têm isto de comum: possuem uma ignorância completa daquilo de que estão a falar.

Hoje, porém, os gritos desapareceram, a teoria da relatividade tornou-se respeitável e tomou o seu lugar como uma pedra fundamental na estrutura da física moderna. O seu criador é considerado «o maior cientista vivo» [1] e a sua fama está mais espalhada do que a de reis e presidentes. É tempo de olhar para trás, a fim de apreciar as revo-

[1] Este livro foi publicado em 1950, ainda em vida de Einstein. — *N. E.*

luções de Einstein como elas se desenvolveram, e ver a influência que têm exercido na nossa era.

Tentemos primeiro remover os efeitos de preconceitos, *slogans* sem significado repetidos milhares de vezes, directamente ou por intermédio da rádio e da imprensa.

Há quem clame ser impossível para a pessoa vulgar compreender as ideias de Einstein. Este é o sumo sacerdote da sabedoria matemática, e só doze homens podem na realidade compreendê-lo.

Não é fácil combater preconceitos. Não posso mesmo dizer que a afirmação de que apenas doze homens compreendem a teoria da relatividade seja falsa. Ela tem tão pouco sentido como a afirmação «apenas doze homens podem na verdade entender Beethoven». Realmente a analogia entre matemática e música, entre Einstein e Beethoven, tem sentido para todos os que gostam de matemática e de música.

Como a música, a matemática e a física matemática são criações artísticas. Como na música, devemos distinguir entre técnicas e ideias. Ninguém pode tocar bem Beethoven ou escrever um trabalho científico sobre a teoria da relatividade sem primeiramente dominar a técnica. No entanto, tal como se pode experimentar uma emoção profunda ouvindo Beethoven, ainda que ignorando totalmente a técnica de tocar, também se pode experimentar um prazer profundo ao compreender as ideias básicas da teoria da relatividade, ainda que se seja ignorante da técnica matemática.

Na verdade, não existe uma única compreensão em ciência; há vários planos. Podemos talvez conseguir escolher um nível tão elevado que apenas poucas pessoas consigam alcançá-lo. Mas quantas? Um dos meus colegas (e distinto matemático) exprimiu dúvidas

sérias sobre se Einstein seria um dos três homens que melhor compreendem Einstein.

Geralmente admite-se que uma pessoa sabe ou não sabe matemática. A verdade é que há vários planos de técnica matemática e estes determinam o nível de dedução que pode ser alcançado por vários homens ao estudarem a teoria da relatividade.

É normal distinguir também entre as teorias restrita e generalizada da relatividade. O conhecimento da teoria da relatividade generalizada requer um conhecimento maior de matemática do que o conhecimento da teoria restrita. No entanto, pode aprender-se a técnica e com o tempo aumentará o número de iniciados nas subtilezas da relatividade matemática.

No nível científico há centenas de pessoas que escreveram trabalhos sobre a teoria da relatividade ou matérias ìntimamente relacionadas com ela. Tal como acontece com qualquer outro domínio da ciência, ela é um livro aberto. Embora o número de novas contribuições seja muito menor do que na teoria quântica, apesar de tudo é ainda elevado. No nível educativo, em todas as boas Universidades há cada vez mais estudantes que compreendem os princípios e a técnica matemática da teoria da relatividade. Quando eu era estudante, a teoria da relatividade não constava dos programas universitários. Hoje, pelo menos em algumas Universidades, os estudantes do 3.º ano estudam as equações básicas da teoria da relatividade restrita e os do 4.º ano a teoria matemática da relatividade. Aquilo que quero realçar aqui parece-me importante. Einstein não podia ter sido um dos poucos a influenciar mais o nosso século se as suas ideias em física fossem compreendidas apenas por algumas pessoas. No futuro é possível que a teoria da relatividade seja ensinada mesmo no liceu. As ideias básicas são, ao mesmo tempo, simples e essenciais, embora o processo de pôr

os resultados em linguagem corrente requeira tempo. O número de pessoas que assimilaram algumas das ideias da teoria da relatividade aumenta e continuará, no futuro, a aumentar. Esta é a razão pela qual Einstein influenciou a cultura moderna. A teoria da relatividade não é sòmente para os sumo sacerdotes do saber. Mais tarde veremos como este tipo abstracto de pensamento influenciou toda a nossa vida. Houve tempos, é certo, em que apenas algumas pessoas podiam compreender completamente a teoria da relatividade. Pouco mais ou menos em 1917 um físico observou ao Prof. Eddington: «Você é um dos três homens que compreendem a teoria da relatividade». Ao ver uma expressão de embaraço aparecer na face de Eddington, o físico disse: «Professor Eddington, não esteja perplexo, o senhor é muito modesto». Sir Arthur respondeu: «Não estou perplexo; estou apenas a pensar em quem será o terceiro».

Tal como acontece em todas as ciências, a teoria da relatividade está baseada em princípios consistentes na experiência. Deduzimos a partir destes princípios e a matemática é o instrumento pelo qual essas deduções são feitas. Se os desenvolvimentos mais avançados deste instrumento são desconhecidos para o leitor, como pensamos, nesse caso omitiremos a maior parte dessas deduções. No entanto, ainda poderemos compreender algumas das ideias básicas e algumas das suas consequências, ainda que tenhamos de omitir a cadeia de raciocínios que vai desde os princípios básicos até às conclusões finais que podem ser provadas experimentalmente. Teremos de traduzir, por meio de analogias e figuras, alguns dos princípios e resultados da linguagem abstracta da matemática para a linguagem comum.

Fazer isto significa divulgar. E quando chegamos ao problema da divulgação da teoria da relatividade,

encontramos um outro preconceito, profundamente enraizado e que vale a pena discutir.

Há muito quem creia que a teoria da relatividade nos diz ser o nosso universo uma espécie de universo de *Alice no País das Maravilhas;* que isto foi revelado pelo matemático Einstein, que descobriu a existência duma quarta dimensão, que os objectos se tornam mais curtos ou mais compridos, que o nosso mundo se contrai ou expande como um balão; que, em suma, tudo é relativo e misterioso. Não é o comboio que pára em Princeton, mas Princeton que pára no comboio. E deste mundo fantástico, relativo, que Einstein criou surgiu repentinamente a bomba atómica.

Os métodos científicos de raciocínio parecem tão diferentes dos usados na nossa vida ordinária porque são mais refinados e mais elaborados. No entanto, são essencialmente os mesmos. Se não atravessamos a rua porque um carro se aproxima, usamos teorias, estamos raciocinando e deduzindo. A cadeia de deduções é, neste caso, tão curta que quase se pode chamar *instinto.* Em ciência a cadeia é incomparàvelmente mais longa. É mais longa na teoria da relatividade do que na mecânica clássica. Com o progresso da ciência esta cadeia torna-se cada vez mais longa e, portanto, cada vez mais difícil de compreender. Mas a árvore da ciência nasce no solo das nossas experiências, e isto é também verdadeiro no que diz respeito à teoria da relatividade.

Como se originou, pois, o preconceito acerca do misterioso universo da *Alice no País das Maravilhas?*

Em 1916, quando a teoria da relatividade era conhecida principalmente entre físicos e matemáticos alemães, mas quase desconhecida do público em geral, Einstein escreveu um livro pequeno, não especializado, sobre as teorias da relatividade generalizada e restrita. Eis alguns extractos do seu prefácio — quase

precisamente as palavras que gostaria de escrever como introdução a este livro:

> Este livro é escrito para aqueles [. . .] que estão interessados no ponto de vista filosófico [. . .], mas não conhecem o formalismo matemático [. . .]; exige muita paciência e força de vontade da parte do leitor. O autor deu-se ao grande trabalho de expressar as ideias principais de forma clara e simples [. . .]. No interesse da clareza, não hesitei em me repetir e não prestei a mínima atenção à elegância de apresentação; aderi sinceramente à receita do grande teórico L. Boltzman pela qual a questão da elegância devia ser deixada aos alfaiates e sapateiros (*Uber die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie,* 1917).

O pequeno livro de Einstein tornou-se clássico.

Mais tarde, em 1920, quando a fama da relatividade e do seu criador se estendeu a todo o mundo, centenas de livros, folhetos e artigos em revistas e jornais foram impressos a respeito de Einstein e da relatividade, dando início a uma era de vulgarização em ciência.

Em breve se verificou que os livros que causavam admiração no leitor misturando ciência com mistério e drama exercem uma atracção maior do que aqueles, como o de Einstein, que apresentam as ideias básicas de forma directa, quase sem colorido. Assim, os exemplos apresentados por Einstein foram repetidos incessantemente por outros e, ao mesmo tempo, eram providos de considerações desnecessárias. Fizeram-se todas as coisas possíveis para tornar a cena mais impressionante e pintar o cientista como um indivíduo diabòlicamente inteligente que descobre os mistérios que a natureza tenta astutamente esconder-lhe.

Estes livros provocavam emoções metafísicas; era possível lê-los com excitação e sentido dramático, embora nada se compreendesse.

Alguns vulgarizadores escreviam com grande habilidade artística, desenvolvendo-se um novo estilo de vulgarização (que, creio, está a desaparecer), e isto originou o preconceito acerca dos mistérios do universo e da ciência.

Ciência é uma estrutura racional; o maior prazer do seu estudo reside na compreensão. Sem isso, saber significa pouco. A existência da ciência e o seu progresso estão baseados na ideia de que o universo não é caprichoso nem misterioso. Como disse o grande matemático Poincaré (e vem a propósito dizer que ele esteve muito perto da descoberta da teoria da relatividade restrita), o maior milagre está em que não aconteçam milagres.

O alvo do nosso raciocínio na vida e na ciência é o mesmo: ordenar e prever os acontecimentos; compreender o mundo das impressões dadas pelos sentidos. As dificuldades inerentes à teoria da relatividade são inerentes a toda a física moderna. Nela não lidamos com coisas tão familiares como a temperatura de ebulição da água, o movimento do pêndulo ou a pressão num cilindro. Mesmo estes simples fenómenos, quando foram descobertos, foram tão abstractos e difíceis de compreender para o vulgo como são hoje o desvio para o vermelho das linhas do espectro ou o encurvamento dos raios luminosos.

Os fenómenos que a física moderna explica são essencialmente os produzidos nos laboratórios modernos com os ciclotrões, espectrógrafos de massa e contadores de Geiger; ou fenómenos astronómicos, como o encurvamento dos raios luminosos das estrelas quando passam na orla solar durante um eclipse; ou os fenómenos das novas partículas produzidas pelos raios cósmicos. Mesmo os fenómenos passados no laboratório que é o universo são interceptados, medidos e analisados pelos mais sensíveis aparelhos fabricados

pelo homem. Qualquer teoria científica, mesmo de carácter especulativo, só tem sentido quando é provada experimentalmente. Morre se falha nesta prova.

Portanto, abordaremos a teoria de Einstein como estrutura racional que é, em parte filosófica e especulativa, e no entanto susceptível de verificação experimental. Não é metafísica nem misteriosa.

Há dez anos a teoria da relatividade parecia uma rede abstracta de pensamento muito longe dos fenómenos que os homens podem observar ou experimentar. Tal não acontece hoje. Tal não acontece desde que 80 000 pessoas morreram em Hiroshima. As relações relativistas entre massa e energia, descobertas por Einstein em 1905, deixaram de ser um raro fenómeno de laboratório. Tornaram-se para todos nós uma questão de vida ou de morte.

A relatividade não nasceu apenas por causa do génio de Einstein, mas foi ele quem originou a revolução para a qual a ciência estava pronta. Escolhido para guiar a revolução, Einstein era o mais pacífico dos homens, um estranho, nem sequer era membro da Universidade. Em 1905 Einstein era um jovem doutorado, com 26 anos de idade, recém-casado e funcionário da Repartição de Registo de Patentes em Berna. Era tímido, delicado e amável. Estudava pouco, mas meditava muito; tinha a grande capacidade de se maravilhar e de se interrogar. Não aceitava dogmas de ninguém. Não creio que tivesse jamais qualidades para ser um bom funcionário, mas a Suíça não o expulsou do serviço do Estado. Permitiram-lhe sonhar, meditar e escrever trabalhos que transformaram a face da ciência.

CAPÍTULO II

O mundo físico antes de Einstein

A origem da teoria do éter

Revoluções em ciência, tal como todos os acontecimentos históricos, surgem quando as ocasiões estão preparadas para elas. Para compreender o que elas são e a razão por que aparecem é necessário analisar a época em que ocorrem.

A primeira revolução einsteiniana aconteceu mais cedo por Einstein ter vivido. No entanto, encontramos na física dos fins do século XIX as sementes donde cresceu a grande obra de esclarecimento de Einstein. Para se compreender a sua obra precisamos de conhecer a situação da física no começo do nosso século. Olharemos para ela do pico alcançado pela ciência moderna; a figura será necessàriamente vaga porque tentaremos observar um terreno vasto no qual os pormenores se apresentam sem grande rigor. Contra este fundo geral, estudaremos alguns pontos isolados que se tornaram mais tarde os focos da revolução. Pareciam muito menos importantes antes de ser formulada a teoria da relatividade, pois foi só a teoria da relatividade que iluminou estes pontos e levou

à compreensão das sérias dificuldades existentes na física clássica.

Começaremos, portanto, com um quadro da física do século XIX. Falando concretamente, teremos de considerá-la em termos de dois ramos principais. Chamar-lhes-emos abreviadamente *teoria mecânica* e *teoria do campo.*

Ligaremos cada um destes ramos ao nome dum homem. É uma simplificação tão grande que quase falsearemos a imagem, pois se chamarmos alternadamente ao ramo mecânico *física newtoniana,* confirmaremos a ilusão de que uma doutrina pode surgir de forma completa da cabeça dum só homem. Na verdade, os fundamentos da teoria de Newton baseiam-se na obra de Galileu, e quando penetramos mais no passado, os elos da cadeia histórica tornam-se mais fracos, apesar de existir ligação com o passado. Mas, visto que damos atenção a esta continuidade histórica em ciência, é-nos permitido ligar a física mecânica ao nome de Newton, cuja famosa obra *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687) constituiu, do ponto de vista mecânico, uma formulação que fez época.

Do mesmo modo, aliaremos a teoria de campo ao nome de Maxwell, se bem que as ideias de Maxwell estivessem baseadas na obra de Faraday e tivessem sido confirmadas mais tarde por Hertz. James Clerk Maxwell morreu em 1879, ano em que nasceu Albert Einstein.

Os vários elementos das teorias mecânica e do campo remontam até às antigas filosofias. No entanto, foi só a ciência do século XIX que desenvolveu completamente estas duas teorias em toda a sua beleza matemática. Os dois ramos da física, coexistindo lado a ladó, representam o resultado final de um crescimento demorado e dinâmico.

Não é difícil distinguir as teorias mecânica e do campo. Hoje ambos estes aspectos da ciência penetraram mesmo na linguagem comum, e quando falamos do mundo que nos rodeia, descrevemos fragmentos dele na terminologia das teorias mecânica e do campo.

Desta forma, quando dizemos que é devido à atracção da gravidade que a Terra gira à volta do Sol descrevendo uma elipse, empregamos a teoria de Newton, ou seja, a linguagem mecânica. Tal afirmação talvez soasse falso no tempo de Newton, mas hoje é vulgar. Para ser claro: desenhemos um ponto, o Sol no foco de uma elipse, e outro ponto, a Terra na sua periferia. Os dois corpos — Terra e Sol — são representados por estes dois pontos ou partículas atraindo-se mùtuamente devido à força da gravidade. Estes são os aspectos característicos da teoria mecânica ou de Newton: partículas e forças simples actuando entre si. Foi precisamente este conceito que teve maior sucesso em mecânica e astronomia e invadiu mais tarde outros ramos da física.

Não é de admirar que o século XIX tentasse aplicar uma interpretação mecânica a todos os domínios dos fenómenos naturais. No tempo de Newton a mecânica era o ramo mais antigo, mais familiar e de maior sucesso na ciência. Assim, para explicar o fenómeno do calor, da luz e do movimento dos líquidos foi preciso inventar uma representação mecânica apropriada. É este o significado da afirmação de que o conceito mecânico dominava na física. Até ao século XIX ninguém imaginava que este predomínio da mecânica pudesse ser destruído. O desenvolvimento da ciência parecia então decorrer, para o futuro da civilização, no domínio da mecânica. O célebre matemático Lagrange, que morreu no início do século XIX, afirmou que Newton era não só o maior, mas o mais ditoso de todos os cientistas, porque a ciência do

nosso mundo só pode ser criada uma vez e foi Newton o seu criador. Da nossa superioridade actual é evidente que os fundamentos da ciência foram criados e recriados e que o grande feito de Newton foi a criação do primeiro elo duma cadeia de revoluções científicas. No entanto, no tempo de Lagrange, e mesmo mais tarde, em quase toda a primeira metade do século XIX, o conceito mecânico espalhou-se e aprofundou-se até atingir o estado de dogma filosófico. Laplace e, mais tarde, Helmholtz formularam este dogma com muita imaginação, ultrapassando os domínios explorados e conhecidos.

Nesses tempos os cientistas pretendiam que todo o nosso universo e nós dentro dele formamos uma máquina gigantesca e complicada que obedece às leis newtonianas. Se conhecermos o estado actual de um sistema mecânico, isto é, as posições e velocidades de todas as partículas, e se conhecermos também as forças que actuam entre essas partículas, poderemos então predizer o futuro de tal sistema ou revelar o seu passado. Na verdade, esta é a forma de resolver o problema mecânico. Por consequência, se o universo em si é uma máquina gigantesca e complicada e se conhecermos o seu estado num determinado momento e a natureza de todas as suas forças, poderemos prever o futuro do nosso universo nos mínimos pormenores e num momento arbitràriamente distante. Substituindo diferentes valores de tempo nas nossas fórmulas, podemos também revelar o seu passado.

O cientista do século XIX descobriu que estava longe de tal objectivo final. Para si era evidente que sabia pouco acerca do estado do nosso universo e das leis que governam a matéria, e ainda menos daquelas que governam a vida e o pensamento. E, no entanto, parecia que nada evitava a aplicação cada vez mais vasta do conceito mecânico, de tal

forma que a ideia de que todos os fenómenos naturais podem ser explicados, eventualmente, pela física de Newton foi considerada um objectivo teòricamente possível.

E no que toca ao outro ramo da física, a teoria do campo? O desenvolvimento deste conceito, na segunda metade do século XIX, introduziu ideias cruciais que, eventualmente, trouxeram o declínio do conceito mecânico. Também o conceito de campo penetrou na linguagem corrente. Assim, se dissermos que ondas electromagnéticas se propagam duma antena e produzem efeitos num receptor de telefonia, estamos usando (pelo menos até certo ponto) a linguagem de campo. Esta frase, hoje lugar-comum, não teria tido qualquer significado para os físicos dos princípios do século XIX.

A teoria de Maxwell, que é válida para os fenómenos eléctricos e ópticos, é uma teoria de campo porque nela o elemento essencial é a descrição das *mudanças*, que se propagam contìnuamente no *tempo*, através do *espaço*. Assim, a noção de campo está em contraste com a de partículas simples na teoria mecânica. (As diferenças entre ambas as teorias também se reflectem matemàticamente: as equações da mecânica são equações diferenciais ordinárias, enquanto as da teoria de campo são equações diferenciais parciais). Uma antena irradia ondas electromagnéticas a que os nossos rádios reagem. Os átomos no Sol, ou num tubo de *néon*, ou numa lâmpada eléctrica, emitem luz à qual reagem os nossos olhos. Quão diferentes são estas duas imagens! Numa delas temos uma antena e um receptor de rádio. Na outra, o átomo — ele próprio uma pequena antena — emite ondas electromagnéticas e o aparelho receptor — os nossos olhos — analisa-as revelando as cores e as formas do mundo visível. Mas ambos os fenómenos são governados pelas

mesmas leis: as equações de Maxwell. Tanto as ondas emitidas pela antena como pelo átomo são ondas electromagnéticas que se propagam no espaço à velocidade de 300 000 km por segundo. O grande progresso da ciência pode aqui referir-se à descoberta de semelhanças inesperadas, e mesmo de semelhanças sob a aparência de diferenças externas.

A teoria do campo provou ter tanto sucesso no domínio dos fenómenos eléctricos e ópticos como o conceito mecânico tem tido em astronomia. Do raio X às ondas hertzianas, incluindo as ondas visíveis da luz, todo este rico e extenso mundo de irradiações é governado por leis de campo, as quais parece terem pouco de comum com a teoria mecânica.

Nenhum físico ortodoxo do século XIX estaria de acordo com tal interpretação. A ideia de duas físicas diferentes, de dois métodos alternativos de pensamento, não seria aceite por eles. Tal físico teria insistido em que o conceito de campo não é, essencialmente, diferente do mecânico e que uma explicação consistente e inteiramente satisfatória poderia ser encontrada para os fenómenos electromagnéticos. Teria argumentado deste modo: «A teoria de Maxwell descreve as ondas electromagnéticas e as leis da sua propagação. Esta simples frase mostra que a explicação é de natureza mecânica. O que é uma onda? Pensemos na onda sonora: esta é produzida pelas partículas do ar. Deste modo, numa onda sonora temos a representação mecânica de partículas e o seu movimento. Ou então pensemos nas ondas da água. Partículas da água oscilam, obrigando as partículas vizinhas a oscilar também. É desta forma que as ondas se propagam, ou, antes, parecem propagar-se. Mas a realidade em que assenta o fenómeno é de natureza mecânica, de corpos em movimento e de forças actuando entre si. O mesmo se passa com as ondas luminosas e sonoras.

Cada onda electromagnética simples pode ser definida, como, por exemplo, no caso das ondas de água, por um comprimento de onda. Por *comprimento de onda* entende-se a distância entre duas cristas sucessivas de onda num dado momento. O comprimento de onda das irradiações visíveis, isto é, da luz, é pequeno em comparação com os comprimentos de onda da rádio, mesmo das ondas curtas. Mas tanto para as ondas hertzianas como para as da luz é possível uma representação mecânica de partículas em oscilação e um meio — base material através da qual se propagam as ondas».

Admitamos que o nosso físico imaginário do século XIX termina a sua argumentação neste momento oportuno. Vamos agora fazer-lhe uma pergunta que deve levantar sérias dificuldades.

Replicamos: «Disseste que a representação em onda é de carácter mecânico porque existe sempre um meio, uma base material através da qual as ondas são propagadas. Com rigor, qual é a base material, a substância, por onde se propagam as ondas? Evidentemente que não é o ar, no caso das ondas sonoras. Não existe ar entre as estrelas e o nosso planeta. Se extrair o ar deste quarto, do lado de fora verei através das janelas precisamente o que via antes. O ar, a água ou qualquer outro meio não estão envolvidos na propagação das ondas electromagnéticas. Ao contrário de quaisquer outras ondas, elas não carecem de base material para a sua propagação. Esta é precisamente a característica que as distingue de quaisquer outras ondas. Onde está, pois, a vossa base mecânica, se não existe qualquer meio material em que se propaguem as ondas?».

Evidentemente estes argumentos não terminariam a discussão. O nosso físico do século XIX defenderia o seu ponto de vista e no decorrer de semelhante

discussão apareceria uma palavra histórica famosa: *éter* — um conceito totalmente supérfluo para a compreensão da física moderna, mas indispensável para entendermos a história desta ciência. O insucesso deste conceito de éter levou à formulação da teoria da relatividade por Einstein.

O físico do século XIX afirma que, em virtude de a propagação das ondas mecânicas (e para ele não existiam quaisquer outras) se efectuar apenas num meio material, deverá existir um meio através do qual se propaguem as ondas electromagnéticas. A este meio chamou *éter* e pressupôs que todo o universo está imerso nesta substância sem peso, acerca da qual conhecia, pelo menos, uma propriedade: a de transmitir ondas electromagnéticas. O mesmo físico assegurar-nos-ia que, com o tempo, seriam descobertas outras propriedades do éter, que então se tornaria tão real como qualquer outro objecto material. Assim, ele admite dois ramos principais da física, mas com o conceito de éter servindo de elo de ligação entre a teoria do campo e a teoria mecânica. Deste modo estava salvo o princípio altamente considerado da unidade.

Recordemos esta imagem e pensemos quanto esforço foi necessário para formação, aperfeiçoamento e justificação do conceito de éter. Só então compreenderemos a revolução que destruiu toda a sua estrutura teórica — revolução que começou quando um jovem funcionário da Repartição de Registo de Patentes da Suíça publicou um trabalho nos primeiros anos do nosso século.

O fracasso do conceito de éter

Em qualquer exposição da teoria da relatividade consideram-se sistemas de referência, ou sistemas coordenados, ou, numa palavra, sistemas.

Tais sistemas são discutidos não só nos problemas de mecânica, como nos de campo. No entanto, foram primeiro o conceito de éter e mais tarde a teoria da relatividade que chamaram a atenção para a sua importância. Muitos dos problemas do éter e, mais tarde, dos da relatividade estão relacionados com dois ou mais sistemas.

Deste modo, numa exposição para leigos é útil pensar em experiências feitas sobre o terreno e, depois, em experiências realizadas, por exemplo, num comboio em movimento. Em todos estes exemplos o nosso planeta e todos os objectos nele imóveis constituem um sistema e o comboio constitui outro. Os dois sistemas movem-se em relação um ao outro e cada um possui o seu ou os seus próprios observadores. Deste modo haverá um grupo de homens — tantos quantos os necessários — fazendo experiências no terreno e outros que fazem experiências no comboio. Estes dois grupos de observadores em ambos os sistemas podem, sendo necessário, comparar as suas notas e discutir os seus resultados. Alguns dos nossos argumentos surgirão nessas discussões. É este, na verdade, se nos é lícito antecipar a nossa narração, um dos mais importantes métodos de argumentação na teoria da relatividade. Os dois sistemas movem-se em relação um ao outro; os observadores em ambos os sistemas encontrarão resultados válidos em relação ao seu sistema; daí o nome de *teoria da relatividade*.

Formulemos agora o princípio da relatividade de Galileu.

Imaginemos dois sistemas em movimento uniforme em relação um ao outro, quer dizer, com velocidade constante, não acelerada, ao longo duma linha recta. Se queremos imaginar o movimento como o de um comboio, devemos considerar um comboio no qual as malas não caiam e os passageiros não choquem uns com os outros; ou então imaginemos um navio que navega tão suavemente que até o passageiro mais sensível não enjoe. Pressupomos o movimento uniforme.

Perguntamos agora: são as leis da mecânica válidas para os observadores em ambos os sistemas ou só num deles? A resposta é evidente: em ambos os sistemas. É isto precisamente o que significa movimento uniforme. Fechemos as janelas, e não haverá possibilidade de verificar o movimento uniforme. Assim, se os nossos observadores compararem os resultados das suas experiências físicas nos dois sistemas, descobrirão que formularam leis idênticas.

É um conceito simples, e se o compreendermos, então compreenderemos o significado do princípio da relatividade de Galileu. Diz assim: «Se as leis da mecânica são válidas nalgum *sistema,* então são válidas em qualquer outro *sistema* em movimento uniforme relativamente ao primeiro».

Qualquer destes sistemas, movendo-se uniformemente, é tão apropriado para as experiências físicas como outro qualquer, e cada um deles pode servir de referência na descrição de movimentos, velocidades, acelerações ou forças.

O essencial não está em que tenhamos dois ou mais sistemas com observadores em cada um deles, mas em que possamos transferir a descrição de um sistema para outro. Tudo isto é simples, mas a simplicidade é enganadora porque depressa descobrimos que se levantam sérias dificuldades por detrás de argumentos aparentemente triviais.

Um homem diz-me que o seu carro anda a 80 km à hora. Se eu quiser ser pedante, posso perguntar-lhe: «Em relação a quê? Em relação à sua casa e ao seu poste de iluminação, ou em relação à Lua e ao Sol?». Perguntas deste género são irritantes, porque, evidentemente, o homem, ao descrever a velocidade do seu carro, referia-se à sua velocidade em relação à Terra ou aos objectos (casa, poste luminoso) ligados *intimamente com a Terra. O movimento só pode ser* descrito em relação a qualquer sistema de referência, e o meu interlocutor desprezou a informação porque era evidente a que sistema se referia.

Quando um comboio se põe em movimento e alguém corre atrás dele, a velocidade em relação à estação é considerável, embora seja quase nula em relação à do comboio. Se alguém correr num comboio com a velocidade A e o comboio vai com a velocidade B, então a sua velocidade em relação à linha será A + B ou A — B, conforme o sentido em que corre.

Formulemos agora o resultado duma forma mais abstracta. Temos dois sistemas: O (o terreno) e O' (o comboio). O sistema O' move-se com a velocidade A em relação a O. Um corpo move-se com a velocidade B em relação ao sistema O'. Para se calcular a velocidade deste corpo em relação ao sistema O é preciso somar as duas velocidades se o corpo se movimenta no sentido de O' (em relação a O), ou subtraí-las se se move no sentido contrário.

Esta regra, que relaciona os resultados das medições de velocidade em dois sistemas, é ao mesmo tempo simples e evidente. Tão evidente, de facto, que quase não vale a pena confirmá-la experimentalmente. No entanto, podemos fazê-lo se quisermos e repetir a experiência tantas vezes quantas desejarmos. Deste modo teremos uma lei à qual de futuro nos referiremos

como *lei da adição das velocidades*. Acabámos de formular:

1.º O princípio da relatividade de Galileu;
2.º A lei da adição das velocidades.

Ainda mais um exemplo antes de abandonarmos estes princípios fundamentais da teoria mecânica: imaginemos que um homem sentado a meio dum longo comboio faz um discurso, ou, para falar fìsicamente, produz ondas sonoras. Perguntemos agora a um observador no comboio e a outro fora do comboio o seguinte:

«Qual é a velocidade destas ondas sonoras no seu sistema?».

O observador do comboio dirá:

«A velocidade das ondas sonoras é a mesma em todas as direcções. O movimento uniforme do comboio em relação à estação não interessa. O meu *sistema* é tão bom como o do chefe da estação. O comboio transporta consigo o seu próprio ar e, portanto, as ondas sonoras propagam-se com a mesma velocidade em todas as direcções».

O observador fora do comboio dirá:

«As ondas sonoras produzidas no comboio movem-se em relação a mim com velocidades diferentes, nos diferentes sentidos. No sentido do movimento do comboio movem-se com velocidade superior à do som. De acordo com a clássica lei de adição de velocidades, essa velocidade será a do comboio mais a das ondas sonoras. No sentido contrário ao do movimento do comboio o som propaga-se com velocidade menor. De facto, esta velocidade em relação a mim será menor do que a velocidade do comboio».

Conservemos estas respostas, pois muito em breve nos referiremos a elas.

Podemos agora deixar a teoria mecânica e, guiados por um físico do século XIX, iniciar uma série de investigações para estabelecer a realidade do éter. O nosso guia está resolvido a conservar o conceito de éter, unificando os conceitos mecânico e de campo. Ele gostaria de que as ondas electromagnéticas fossem tão reais e mecânicas como as ondas sonoras.

De acordo com o nosso guia, cuja teoria aceitaremos para experiência, imaginemos as ondas luminosas apenas como ondas no éter. Concretizando, imaginemos que uma lâmpada, ao emitir sinais luminosos, é acendida e apagada sucessivamente. Se preferirmos, podemos, em vez disso, pensar em sinais radiofónicos, visto que as ondas luminosas e hertzianas se propagam no éter com a mesma velocidade. Deste modo estamos efectuando uma experiência semelhante à descrita anteriormente, no caso das ondas sonoras. Investigamos os sinais luminosos emitidos do meio do longo comboio e perguntamos aos observadores dentro e fora do comboio qual a velocidade da luz em relação aos respectivos *sistemas*. Evidentemente, podemos imaginar que se podem medir estas velocidades, mas preferimos fazer a nossa pergunta antes que os observadores tenham ensejo de o fazer. Deixemo-los predizer e prever as possíveis respostas.

O observador no comboio dirá: «Como é óbvio, o meu *sistema* é tão bom como o do chefe da estação. As janelas do meu comboio estão fechadas e é razoável supor que o éter é transportado com o meu *sistema*, tal como o ar era transportado no caso das ondas sonoras. Nesse caso, a velocidade da luz no meu *sistema* continua a ser de 300 000 km por segundo, em toda a parte e em todas as direcções».

O observador fora do comboio dirá: «A velocidade deste sinal luminoso será diferente em diferentes direcções. Será maior do que a normal no sentido do movimento do comboio em relação a mim. Neste sentido será igual à soma das velocidades da luz mais a velocidade do comboio. No sentido oposto será igual à velocidade normal da luz menos a velocidade do comboio».

Portanto, os observadores apresentaram as suas predições, que podem agora ser comprovadas experimentalmente. Do resultado de uma experiência não há em ciência qualquer outro apelo.

Se fizéssemos a experiência indicada, a predição do *observador fora do comboio* mostrar-se-ia, contra o que esperávamos, ser falsa. Com efeito, o observador dentro do comboio verificará que a velocidade da luz é igual em todos os sentidos. A sua predição era, afinal, correcta, ao passo que o observador fora do comboio estava, sem dúvida, errado. Verificaria que também para ele a velocidade de propagação do sinal luminoso é a mesma em todos os sentidos, sempre de 300 000 km por segundo, nem maior nem menor. Reconheceria que para si a luz se comporta como se a sua origem e o éter estivessem em repouso; o facto de a lâmpada se movimentar com o comboio não interessa nada. (O resultado desta experiência teórica foi estabelecido indirectamente e de forma inteiramente segura por meio de observações científicas). Assim, a experiência profere a sua sentença: a velocidade da luz é a mesma para ambos os observadores, dentro e fora do comboio.

Por conseguinte, a lei da adição das velocidades falhou. Que vantagem há então em admitir a existência dum éter se este meio não actua como se supunha e, em vez de nos ajudar a prever acontecimentos, nos lança em novas dificuldades? O éter,

que devia ligar as teorias do campo e mecânica, transgrediu a mecânica infligindo a lei da adição de velocidades.

Preconceitos muito enraizados custam a desaparecer. O físico do século XIX não estava preparado para sacrificar o conceito de éter. Não podia negar a evidência experimental, mas podia alterar a sua discussão. Na verdade, ele podia encontrar uma explicação aceitável para o seu insucesso. Poderia dizer, e diz de facto: o comboio não transporta o éter, como transporta o ar, mas flutua num mar de éter, como um barco a navegar em águas tranquilas; do mesmo modo, a Terra, no seu movimento diário em torno do Sol, é impelida através desse calmo mar de éter. Assim, a nossa representação anterior estava errada, e temos de recomeçar a experiência, pedindo outra vez aos nossos observadores para preverem os resultados e compararem-nos com o produto das experiências. Procedendo assim, aproximamo-nos do ponto mais interessante da nossa história. Há outra vez dois observadores, um fora, no sossegado mar de éter, outro flutuando no calmo mar de éter. De novo registamos as previsões, mas agora, para sermos mais coerentes, mudamos ligeiramente a nossa representação. Imaginamos um observador em relação, não com a Terra, mas com qualquer *sistema* — talvez, por exemplo, o Sol ou as estrelas: *o sistema* em que o mar de éter está em repouso. *Este sistema* é o único em que o éter está em repouso; todos os outros corpos se movem em relação a ele. O «observador universal», isto é, aquele para quem o éter está em repouso, dirá:

«Para mim a velocidade da luz é a mesma em todos os sentidos porque está em repouso o meio através do qual se propagam as ondas luminosas».

E em relação ao observador que flutua neste mar etéreo? Suponhamo-lo num sistema em movimento,

como um comboio, e que, como anteriormente, ele emite um sinal no sentido do movimento e outro no sentido oposto. Esse observador dirá então:

«Se emito um sinal — isto é, uma onda luminosa — no sentido do movimento do comboio, então essa onda desloca-se através do mar de éter em repouso, mas a parede para a qual a onda se dirige afasta-se dela. A parede oposta move-se no sentido da onda. Assim, as duas paredes não serão alcançadas simultâneamente pelos sinais luminosos. A parede que se afasta será alcançada mais tarde; a parede oposta será a primeira a ser atingida pelas ondas luminosas.

A velocidade da luz não será, portanto, a mesma em ambos os sentidos. Será menor do que a velocidade normal no sentido da parede que se afasta, mas maior do que a velocidade normal na direcção da parede oposta. Representemos a velocidade normal da luz por *c*, isto é, *c* significa 300 000 km por segundo. Eu considero a velocidade da luz menor do que *c* na direcção do movimento e maior do que *c* na direcção oposta».

Estas previsões são evidentes. Antes de as pormos à prova pela experiência abramos um parêntese para reforçar a importância da representação que esboçámos.

De acordo com esta nova representação, há um e só um *sistema* no qual o éter está em repouso. Tal *sistema* distingue-se de todos os outros. É, como dissemos *o sistema*. Deste modo, fomos logrados nos nossos próprios raciocínios. O físico que aceita o conceito de éter, ao tentar formular um conceito de éter que unificaria as teorias mecânica e de campo, é obrigado a «minar» a própria teoria mecânica. Ele está resolvido a sacrificar o princípio da relatividade de Galileu, parte essencial da teoria mecânica. Isto porque o princípio da relatividade de Galileu considera equivalentes todos os sistemas em movimento relativo uni-

forme. Mas para o físico que acredita no éter tal não acontece. Entre os *sistemas* existe um diferente de todos os outros, *o sistema* no qual o éter está em repouso, o único em que a velocidade da luz é *c*. Deste modo, o princípio da relatividade de Galileu já não pode considerar-se verdadeiro. O éter substitui-o por uma teoria absoluta. O físico do século XIX, ao tentar salvar a teoria mecânica, pô-la em perigo ao abandonar o seu princípio básico da relatividade.

Que mostra a experiência? Todas as nossas observações astronómicas indicam claramente que, se existe um mar de éter em repouso, o nosso planeta, no seu movimento diário em volta do Sol, se desloca em relação a ele. Assim, o nosso exemplo do comboio flutuando num mar de éter é muito bem representado pela Terra movendo-se em volta do Sol com a velocidade aproximada de 30 km por segundo. Por consequência, na Terra a velocidade da luz no sentido do movimento da Terra seria ligeiramente menor do que a velocidade no sentido oposto. A célebre experiência de Michelson-Morlay, realizada em 1887, tinha como alvo descobrir essa diferença. O resultado foi negativo. Provou-se definitivamente que não existem diferentes velocidades de propagação da luz. A velocidade é a mesma em todos os sentidos e o seu valor é *c*; a velocidade da luz, por mais estranho que pareça, permanece fiel a si mesma, sempre constante, sempre invariável. O resultado foi catastrófico para o adepto da teoria mecânica. O conceito de éter, que prometia a unificação dos conceitos mecânico e de campo, conduziu a incongruências inevitáveis. Um éter que não se move nem repousa, que não é transportado pelos corpos nem permite que os corpos deslizem nele, é um fiasco lamentável. Todas as tentativas para considerar o éter como uma base material para a propagação das ondas falharam por completo, e ficámos

de novo perante dois ramos da física aparentemente contraditórios, sem qualquer conceito unificador.

Como disse já, os preconceitos científicos custam a desaparecer. A vontade de descobrir um meio para a propagação das ondas electromagnéticas era tão forte que mesmo depois de se provar que o éter não repousa nem se move se fizeram ainda tentativas para conservar o conceito de éter pela introdução de novos conceitos que tornaram a estrutura da física teórica mais complicada, mais artificial e menos convincente.

Olhemos uma vez mais a situação da física, ou, antes, as suas bases no início deste século.

A teoria mecânica aceitava:

O princípio da relatividade de Galileu;
A regra da adição das velocidades.

As experiências sobre as ondas luminosas e electromagnéticas levaram-nos às seguintes conclusões:

A velocidade das ondas electromagnéticas, ou luminosas, é sempre a mesma e é independente do movimento da origem ou do observador.

O último resultado era incompatível com o conceito de éter. Era mesmo incompatível com a regra da adição de velocidades.

A velocidade da luz juntamente com a velocidade dum *sistema* originam a imutável velocidade da luz.

Não só falhou o conceito de éter, mas ainda se contradizem entre si os conceitos mecânico e de campo. A experiência revelou contradições aparentemente irremovíveis na representação científica do mundo exterior.

A física estava madura para a revolução de Einstein.

Que queremos dizer em física por uma revolução?

Queremos dizer: um esclarecimento súbito dos nossos princípios, formação de uma nova representação, uma solução de contradições e dificuldades. Tem havido muitas revoluções científicas, mas a de Einstein tornou-se a mais célebre. Entre os seus resultados, existe um que desempenhará no futuro um papel importante na formação da vida e na morte do nosso planeta.

CAPÍTULO III

A primeira revolução einsteiniana

Um e dois, mas não três

Annalen der Physik é uma revista alemã, encadernada em volumes grossos, cheia de trabalhos científicos, em geral muitíssimo especializados e eruditos e repletos de notas e referências bibliográficas. O vol. XVII dos *Annalen der Physik*, impresso em 1905, contém um trabalho, com trinta páginas, de Einstein denominado «Sobre a electrodinâmica dos corpos em movimento». O título parece modesto, e no entanto, quando lemos o texto, verificamos imediatamente que é diferente de todos os outros. Não há referências bibliográficas, não se citam autoridades e as poucas notas, no fundo das páginas, são de natureza explicativa. O estilo é simples e uma boa parte deste artigo pode ser compreendida sem grandes conhecimentos técnicos. Mas a compreensão completa dele requer uma mente e um critério amadurecidos, que são mais raros e preciosos do que qualquer conhecimento pedante. O trabalho de Einstein trata dos problemas mais básicos; analisa o significado de princípios que pareciam simples de mais para serem analisados.

Há pouco tempo, ao reler o trabalho de Einstein, fui mais uma vez impressionado pela sua forma perfeita. Ainda hoje a sua apresentação e o seu estilo nada perderam da sua frescura. Continua mesmo a ser a melhor fonte onde aprender a teoria da relatividade.

Lemos na segunda secção do trabalho de Einstein o seguinte:

> 1. As leis de acordo com as quais a condição de um sistema de física muda são independentes dos ditos sistemas coordenadores em movimento uniforme relativo aos quais essas leis se referem.
>
> 2. Todo o raio luminoso se propaga num sistema coordenado «em repouso», com uma velocidade definida *c*, independentemente do sistema, quer seja emitido por uma origem em repouso quer em movimento («Zur Elektrodynamic bewegter Körper», *Annalen der Physik*, vol. XVII, 1905).

Eis os fundamentos sobre os quais se ergue a teoria da relatividade. São princípios simples, baseados na experiência. Como havemos de ver, a solução das nossas dificuldades vem da aceitação do inevitável. Como acontece num romance policial, é a solução mais óbvia, a qual consistentemente nos tínhamos recusado a aceitar.

Mas, se desejarmos compreender a teoria da relatividade, deveremos compreender inteiramente os princípios em que se baseia. Tudo o resto é dedução lógica, e não pode haver maior conteúdo nos resultados deduzidos do que o existente nas hipóteses das quais eles vêm.

O primeiro princípio é a reposição do princípio da relatividade de Galileu, já descrito no capítulo anterior. Postula que todas as leis da natureza são as mesmas em dois *sistemas* em movimento uniforme relativo e que não é por meio de fenómenos mecâ-

nicos nem por meio de fenómenos electromagnéticos que podemos descobrir esse movimento uniforme relativo. O físico do século XIX pensava haver um éter e que *o sistema* em que este éter estava em repouso era distinto de todos os outros. Mas esta suposição estava em contradição com a experiência, e Einstein sugere que aceitemos, sem mais apelo, as conclusões da experiência. Quer estejamos investigando fenómenos mecânicos, quer electromagnéticos, todos eles são governados pelo princípio da relatividade: não existe maneira de diferençar entre *dois sistemas* em movimento uniforme relativo. Mas se isto é verdadeiro, é possível demonstrar que o conceito de éter é inútil. Causou bastante confusão, e não há possibilidade de determinar a sua presença. O conceito de éter não incluiu as leis que governam os fenómenos electromagnéticos no quadro teórico da mecânica clássica; a sua estrutura provou ser demasiadamente fantástica e artificial para servir de traço de união entre estes dois ramos da física.

Deste modo, é-nos possível caracterizar a obra de Einstein como destruindo, duma vez para sempre, o conceito de éter, que fora inventado para unir as leis do campo às leis da mecânica. Mas, ao fazê-lo, não destruiu a conexão existente entre estes dois domínios da física; pelo contrário, aproximou-os ainda mais. Agora temos um princípio unificador no conteúdo físico do princípio da relatividade de Galileu, que governa tanto os fenómenos mecânicos como os do campo.

Voltemos agora ao segundo princípio básico da teoria da relatividade restrita. É igualmente simples e declara apenas que a velocidade da luz é sempre a mesma, qualquer que seja o *sistema* em que a medimos: quer a meçamos dentro quer fora do comboio.

Talvez nos sintamos desapontados. Onde está então a grande revolução de Einstein? Estes dois princípios são apenas a formulação de resultados experimentais, e tudo quanto Einstein parece ter feito foi aceitar o inevitável. Onde está, portanto, a originalidade da teoria de Einstein?

O passo seguinte no nosso argumento é importante. Não obstante a simplicidade das suposições fundamentais de Einstein, ao serem consideradas em conjunto tornam-se revolucionárias. Até ao tempo de Einstein estes dois princípios pareciam estar em contradição. Einstein removeu a discrepância, mas, ao fazê-lo, foi obrigado a modificar os princípios mais fundamentais do espaço e do tempo.

Os dois princípios parecem contradizer-se inevitàvelmente um ao outro. Como pode, pois, a velocidade da luz ser, num comboio em movimento, *c* e ser também *c* fora dele? Não deveria ser maior no sentido do movimento do comboio e menor no sentido oposto? Ou, invertendo o raciocínio, se a velocidade da luz para o observador colocado fora do comboio é *c*, não deveria ser diferente dentro do comboio? Antes da teoria da relatividade parecia impossível escapar a esta conclusão, pois partia do capítulo, respeitável pelo tempo, da mecânica sobre a combinação de velocidades em dois *sistemas* diferentes. O princípio simples de uma velocidade constante da luz contradiz o princípio, simples também, da adição e subtracção de velocidades da luz (ou qualquer outra velocidade) com a velocidade do *sistema*.

Para maior clareza, escrevamos os três princípios:

1. Princípio da relatividade;
2. Constância da velocidade da luz;
3. Adição das velocidades.

Não nos é possível aceitar todos três. Temos de rejeitar o 2 se aceitarmos o 1 e o 3. Eis a solução dada por Einstein: aceitemos o 1 e o 2 e tiremos as nossas conclusões. Veremos que, ao fazê-lo, o 3 não pode ser aceite como rigorosamente válido. O 3 *não é*, pois, rigorosamente válido, e a experiência no-lo mostrará realmente. É necessário edificar uma física nova, baseada nas suposições básicas 1 e 2. Semelhante física pode de facto ser edificada, uma física coerente com a lógica e coerente com a experiência; uma física nova, relativista, da qual a velha física de Newton é apenas uma aproximação, útil e válida para os corpos movendo-se com velocidades pequenas em comparação com a da luz, mas sem valor se as velocidades dos corpos em movimento se aproximam da da luz. Portanto, ao considerarmos automóveis e aviões supersónicos, ou mesmo os planetas do sistema solar, podemos ainda aplicar os princípios da mecânica clássica; mas se estamos tratando de electrões, que se movem com velocidades, por exemplo, apenas 10 % menores do que a da luz, é mais correcto dizer que Einstein demonstrou as limitações da mecânica de Newton. Mas o campo em que essa teoria de Newton se aplica é ainda vasto; e durante muito tempo ainda continuará ela a ser ensinada nas nossas escolas e a ser aplicada na vida diária.

O relógio em movimento

Para poder construir uma física coerente, baseada nos dois princípois de Einstein, temos de fazer uma revisão radical dos nossos conceitos de espaço e tempo. Parece quase incrível que anteriormente estes conceitos básicos e intuitivos nunca tivessem sido definidos

em física. Eram erròneamente considerados demasiadamente evidentes para necessitarem de esclarecimento ou análise. No entanto, se tentarmos defini-los, imediatamente encontraremos dificuldades impossíveis de prever e que apenas podem ser resolvidas na teoria da relatividade de Einstein.

Eis a questão simples que Einstein pôs e à qual respondeu: «Qual o significado da frase 'dois acontecimentos simultâneos'?». Ainda que nesse tempo (1905) a física se tivesse tornado muito complicada, o princípio de dois acontecimentos simultâneos parecia tão pouco duvidoso que ninguém antes de Einstein se dera ao trabalho de o verificar. Foi precisamente o que Einstein fez, começando a sua análise com a sentença mais simples que jamais achei num trabalho científico:

> Todos os nossos raciocínios nos quais o tempo tem um papel são opiniões acerca de acontecimentos simultâneos. Se eu disser, por exemplo, «o comboio chega às 7», quero dizer que a coincidência do ponteiro pequeno do meu relógio com as 7 e a chegada do comboio são acontecimentos simultâneos» *(Zur Elektrodynamic bewegter Körper).*

Temos aqui um caso simples de dois acontecimentos simultâneos (coincidência do ponteiro pequeno do relógio com o número 7 e a chegada do comboio), verificando-se nas proximidades um do outro, e para o qual nos é dado um significado. Mas que significa afirmar que dois acontecimentos em Nova Iorque e em S. Francisco são simultâneos? A questão torna-se agora mais complicada, sendo-nos necessário reflectir um pouco antes de responder. A resposta mais simples seria que os dois relógios, um em S. Francisco e o outro em Nova Iorque, são simultâneos. Esta resposta talvez pareça boa depois de acrescentar algumas con-

sideraçoes. Primeiro, temos de saber que ambos são bons relógios e, para simplificar a questão, podemos admitir que são construídos da mesma forma, ou, como devemos dizer, são relógios idênticos. Não é fácil dizer o que é um bom relógio, mas deixemos essa dificuldade, pois que não há grande perigo em ignorá-la. Evidentemente, se um deles indicasse a hora local de Nova Iorque e o outro a hora local da costa do Pacífico, os dois acontecimentos não seriam simultâneos quando ambos os relógios indicassem a mesma hora. Não só devem ter o mesmo ritmo, mas devem também mostrar, simultâneamente, a mesma hora, ou, em poucas palavras, devem estar *sincronizados*. Que quer dizer que ambos os relógios estão sincronizados? Imaginemos que são 7 em ponto em Nova Iorque e mandamos um sinal radiofónico dizendo a um observador em S. Francisco para pôr o seu relógio nas 7. Se ele o fizer, ficarão os dois relógios sincronizados? Rigorosamente, não. O sinal radiofónico propaga-se a uma velocidade grande, mas finita — a da luz. Assim, se o observador em S. Francisco recebe o sinal dizendo que são 7, ele tem de pôr o relógio um pouco além das 7: para ser exacto, 7 mais o tempo que o sinal levou a propagar-se entre as duas cidades.

Podemos, no entanto, imaginar uma experiência simples para saber se os dois relógios, nessas duas cidades, estão sincronizados ou não. Imaginemos um ponto exactamente a meio caminho entre Nova Iorque e S. Francisco. Nesse lugar olhemos para uma imagem televisada dos dois relógios. Se na imagem os dois relógios mostrarem sempre a mesma hora, então estão sincronizados. Então, e só então, podemos usá-los para determinar acontecimentos simultâneos. Da mesma maneira, podemos agora imaginar relógios sincronizados em todo o mundo. Sempre quaisquer dois

deles dariam imagens televisadas idênticas num ponto, exactamente a meio caminho entre os dois.

Só agora, depois de termos feito tudo isto, podemos decidir se dois acontecimentos, em dois lugares diferentes, são simultâneos ou não. A nossa análise da simultaneidade não está, porém, terminada. Tudo o que afirmámos até agora sobre dois acontecimentos simultâneos é verdadeiro tanto na mecânica clássica como na teoria da relatividade. A física clássica não se importou com a formulação destes princípios porque parecia que pouco se ganharia com uma análise tão escrupulosa.

A divergência entre os dois princípios, clássico e relativista, da simultaneidade é evidente se considerarmos apenas acontecimentos simultâneos em dois *sistemas*. Já descrevemos quão decisivo é, na teoria da relatividade, o considerar dois sistemas diferentes e deixar que dois observadores, em ambos os sistemas, discutam os resultados das experiências que fizeram. Por isso, devíamos agora pensar em dois *sistemas;* por exemplo, a Terra, com os seus objectos imóveis, e um comboio em movimento. Cada observador na Terra teria tantos relógios sincronizados quantos os necessários para determinar os acontecimentos em lugares diversos e o observador no comboio teria também os seus relógios sincronizados. Cada *sistema*, nesse caso, teria os seus próprios relógios sincronizados para saber as horas em que os acontecimentos se davam.

Chegamos agora ao ponto essencial. Imaginemos dois acontecimentos. Podemos pensar em dois acontecimentos simples, tais como dois sinais luminosos, emitidos em momentos diferentes, de dois pontos diferentes do espaço. Uma lâmpada é acendida e apagada, em dado momento, num certo ponto do espaço: eis um acontecimento. Consideremos em se-

guida dois acontecimentos semelhantes e perguntemos se são ou não simultâneos. Suponhamos que o observador na Terra verifica que esses dois acontecimentos, a julgar pelos seus relógios, são simultâneos. E o observador no comboio? Verificará também que são simultâneos?

Eis uma questão crucial. É neste ponto que as respostas da física clássica e da teoria da relatividade diferem radicalmente. Como veremos mais tarde, a teoria da relatividade, ao definir rigorosamente, pela primeira vez, o princípio da simultaneidade, tirou dele novas conclusões, essenciais para o desenvolvimento posterior da ciência.

O físico clássico diria:

«Evidentemente, dois acontecimentos simultâneos num *sistema* (a Terra) são-no também num outro *sistema* (o comboio). É-lhe permitido usar vários relógios em pontos diferentes e até relógios diferentes em *sistemas* diferentes. Concordei com a sua definição de sincronização e aceitei-a inteiramente, mas nada disto pode mudar as minhas conclusões de que dois acontecimentos simultâneos num *sistema* são simultâneos noutro. Os relógios não mudam o seu ritmo quando estão em movimento. Não interessa se se consulta um relógio em repouso ou um em movimento, ou se os observadores usam relógios pessoais para qualquer dos *sistemas* ou relógios universais para todos os *sistemas*. Como disse Newton, o tempo é absoluto, e isto quer precisamente dizer que o tempo não muda de um *sistema* para outro e que podemos usar uma série de relógios para todos os *sistemas*. O tempo corre uniformemente para todos os observadores. Assim, dois acontecimentos que são simultâneos num *sistema* sê-lo-ão noutro. Não há a mínima prova de que um relógio altere o seu ritmo quando

em movimento. Comecemos uma viagem rápida em Southampton, e o relógio dará a mesma hora que o relógio em Nova Iorque se os dois forem sincronizados no início da viagem».

O físico clássico insiste, desta forma, em que o tempo é absoluto e o relógio não altera o seu ritmo. Aqui o relativista faria uma simples pergunta:

«Como sabe que um relógio não altera o seu ritmo quando em movimento?».

Os raciocínios vazios e longos são raros em física. A consistência interna de uma teoria e as provas da experiência devem levar, em pouco tempo, a uma decisão final. Um apelo dessa decisão para o senso comum é enganador, visto que o julgamento do senso comum, nessa questão, pode reflectir um preconceito universal que não sobreviverá a um exame rigoroso e será destruído se o progresso do pensamento científico tem de ser assegurado. Com o decorrer do tempo, um apelo à autoridade, mesmo tão alta como a de Newton, também será de pequeno auxílio. As teorias de Newton foram, no seu tempo, consistentes, mas a ciência no tempo de Newton não estava preparada para a teoria da relatividade. A aceitação do tempo absoluto não levou a contradições quando aplicada a factos conhecidos até ao século XIX. Na verdade, teria sido fútil pensar que o relógio, na sua viagem de Southampton para Nova Iorque, alterasse o seu ritmo. Não era possível, por meio da experiência, determinar essa alteração. Mas o que aconteceria se o mesmo navio navegasse a uma velocidade pouco menor que a da luz? Continuaria inalterável o ritmo desse relógio? Nos princípios do século XIX esta questão seria puramente académica, mas hoje já o não é. Presentemente podemos obrigar partículas a movimentarem-se com uma velocidade apenas um pouco menor que a da luz.

Voltemos à nossa pergunta:

«Um relógio altera o seu ritmo quando em movimento?».

A teoria da relatividade responde: sim, altera. Dois acontecimentos simultâneos num *sistema* não são simultâneos noutro, *não havendo tempo absoluto.* É necessário um conceito de tempo relativo para a consistência interna da nossa teoria e para a sua concordância com a experiência.

Chegámos agora a um ponto essencial do nosso raciocínio. Acabámos de ver em que ponto os desenvolvimentos clássico e relativista divergem. O conceito de tempo mudou; um assunto sobre o qual filósofos escreveram muitos volumes foi transformado por considerações levantadas no domínio da física.

O carácter relativista de tempo e o conceito de simultaneidade podem ser deduzidos de dois princípios fundamentais da teoria da relatividade:

1. A equivalência de *sistemas* em movimento relativo uniforme;
2. A constância da velocidade da luz.

Explicaremos agora a razão pela qual o carácter absoluto da simultaneidade deve ser sacrificado se estes dois princípios da teoria da relatividade forem aceites.

Lancemos do meio dum comboio (*sistema* em movimento), num dado momento, dois raios luminosos em sentidos opostos. Visto que a velocidade da luz, *c*, é constante para o observador dentro do comboio, no seu *sistema* estes dois raios luminosos alcançarão as duas paredes opostas ao mesmo tempo e, para ele, estes dois acontecimentos (o bater dos raios luminosos contra as duas paredes opostas) serão simultâneos. E para o observador na parte de fora do comboio,

na Terra? Também para ele a velocidade da luz é a constante *c* no seu *sistema;* mas, olhando do comboio, vê que uma parede se afasta da luz e a parede oposta se move para a luz. Deste modo, para ele, um raio luminoso encontrará primeiro a parede que se move para ele e só pouco depois encontrará a que dele se afasta. Isto leva à conclusão inevitável de que dois acontecimentos simultâneos para os observadores num *sistema* não são simultâneos para os observadores num segundo *sistema* movendo-se uniformemente em relação ao primeiro.

Eis aqui, na verdade, uma revolução nos nossos hábitos de pensar e no nosso uso da linguagem. A frase «dois acontecimentos ocorridos ao mesmo tempo» não faz sentido se não especificarmos, ou, pelo menos, discretamente explicarmos, a que *sistema* nos referimos. A diferença de raciocínio entre os observadores, dentro e fora (comboio-Terra), deve ser atribuída ao emprego de relógios diferentes, visto que ambos os *sistemas* têm os seus relógios particulares. Concluímos que um relógio altera o seu ritmo quando em movimento.

Galileu e Lorentz

Não podemos ir muito mais longe sem o auxílio da matemática. Tudo quanto Einstein fez foi exprimir os seus dois postulados numa forma matemática, rigorosa, que lhe deu possibilidades de tirar novas conclusões. Não seria difícil seguir o raciocínio de Einstein, mas isso requereria o uso da técnica matemática, e em qualquer altura dessa investigação seria necessário que aqueles que estão familiarizados com essa técnica e os que não estão se separassem. Para os

que não estão familiarizados com a técnica matemática é necessário não usar mais de dedução. Tudo quanto se pode fazer é explicar os resultados dessas deduções matemáticas em termos de linguagem comum.

Seremos, no entanto, obrigados a usar uma expressão que só pode ser compreendida com a ajuda da matemática. Não definiremos rigorosamente essa expressão importante, mas apresentá-la-emos na teoria da relatividade: *a transformação de Lorentz*. Constitui ela o pilar sobre o qual assenta a teoria da relatividade.

Para fazer uma ideia de como a transformação de Lorentz é usada, consideremos, como antes, a situação dos dois sistemas em movimento uniforme relativo. Imaginemos, para dar um exemplo concreto, um autocarro a grande velocidade na 5.ª Avenida. O autocarro tem o comprimento de quatro quarteirões e é muito estreito; podemos deixá-lo movimentar-se a qualquer velocidade mas uniforme. A posição de qualquer observador em repouso nesse autocarro pode ser assinalada por um número (lembremo-nos de que esse autocarro é muito estreito) representando a distância a partir do seu centro; diremos ainda que a distância é positiva no sentido do movimento e negativa no outro. Se desejarmos usar a terminologia matemática, diremos que cada observador, ou cada partícula, tem uma *coordenada* que representa a sua posição no autocarro e em relação a este. Agora, para o observador no exterior, na 5.ª Avenida, o centro do autocarro muda a sua posição com o tempo. Em relação ao quadro fixo dos quarteirões da 5.ª Avenida, a posição do centro do autocarro será primeiro a Rua 42, em seguida a Rua 69, etc. Se a posição do centro do autocarro for a Rua 42, a do motorista será a Rua 44 e a do último passageiro a Rua 40, visto que o autocarro tem o comprimento de quatro quarteirões. Tudo isto é simples e quer dizer que

em qualquer momento podemos achar a coordenada de qualquer observador no autocarro, em relação ao *sistema* da 5.ª Avenida, se soubermos qual a coordenada do observador em relação ao autocarro, a velocidade deste e de onde e quando partiu ele. Temos, em linguagem científica e de acordo com a mecânica clássica: a coordenada no *sistema* da 5.ª Avenida é igual à velocidade do autocarro multiplicada pelo tempo da viagem mais a coordenada no *sistema* do autocarro.

Suponhamos que algo acontece no autocarro, por exemplo, a emissão de um sinal luminoso. Para descrever este acontecimento temos de saber quando e onde se deu. Precisamos de usar dois números para a sua descrição: um indicando o espaço e o outro a coordenada do tempo. Enquanto a coordenada do espaço será diferente para o observador na 5.ª Avenida e para o observador no autocarro, o outro número, indicando o tempo, será, *de acordo com a mecânica clássica,* igual para todos os observadores, visto que o tempo é absoluto e um relógio não altera o seu ritmo quando em movimento. Deste modo, conhecendo as coordenadas do espaço e do tempo de um dado acontecimento num *sistema* e a velocidade relativa dos dois *sistemas,* podemos achar as coordenadas do espaço e do tempo no outro *sistema.* A regra para achar a coordenada do espaço já foi indicada. A regra para a coordenada do tempo é muito simples: as coordenadas do tempo são iguais. Assim, dois *sistemas* movendo-se uniformemente em relação um ao outro, dois sistemas nos quais as leis da física são iguais, estão ligados um ao outro pela chamada *transformação de Galileu* — regra que permite achar as coordenadas de acontecimentos num *sistema* se forem conhecidas noutro.

Aquilo que a teoria da relatividade afirma ou, antes, deduz dos seus dois princípios é que a transformação de Galileu não tem valor. Podemos expô-lo melhor dizendo que é pràticamente válida se as velocidades relativas forem muito pequenas em relação à velocidade da luz. Deixa de ter qualquer valor se as velocidades relativas forem quase as da luz. Deste modo, podemos aplicar a mecânica clássica e a transformação de Galileu se se tratar de automóveis, aviões supersónicos e até foguetões, visto que, com efeito, estamos tratando de fenómenos da mecânica clássica. Mas, por exemplo, no campo da física atómica moderna, em rápida expansão, em que a natureza ou a técnica nos fornece frequentemente velocidades que não são pequenas em comparação com a velocidade da luz, a transformação de Galileu não tem valor e necessita de ser substituída pela transformação de Lorentz. A transformação de Lorentz consegue fazer para as grandes velocidades aquilo que a de Galileu não conseguiu. Dá-nos uma forma de encontrar as coordenadas do espaço e do tempo dos acontecimentos num *sistema* se forem conhecidas noutro e se a velocidade relativa desses dois *sistemas* for conhecida. Qual a diferença essencial entre as transformações de Galileu e de Lorentz? Enquanto na transformação de Galileu a coordenada do tempo dum acontecimento é a mesma para todos os *sistemas*, tal já não acontece na de Lorentz. O ritmo de um relógio altera-se de acordo com a relatividade do tempo, e dois acontecimentos simultâneos num *sistema* não são simultâneos noutro. Não seria correcto dizer que a transformação de Lorentz dá bons resultados para as grandes velocidades, enquanto a de Galileu se aplica às pequenas. Seria mais correcto afirmar que a transformação de Lorentz é sempre válida. Para pequenas velocidades não há diferença entre a transformação

de Galileu e a de Lorentz, mas há uma diferença importante e acessível à verificação experimental quando a velocidade se aproxima da da luz.

Não escreveremos a equação da transformação de Lorentz, ainda que um conhecimento ligeiro de álgebra fosse suficiente para a sua compreensão. Basta dizer que esta transformação relaciona, duma forma nova, as coordenadas do tempo e do espaço de um acontecimento num *sistema* com as coordenadas do tempo e do espaço do mesmo acontecimento noutro *sistema* e que esta relação pode ser deduzida dos dois princípios básicos formulados por Einstein no seu famoso trabalho. Esta transformação leva-nos de um *sistema* ao outro, se ambos se moverem uniformemente em relação um ao outro. Como as leis naturais nos dois *sistemas* são as mesmas, podemos dizer que é a transformação de Lorentz, e não a de Galileu, que deixa sem alteração as leis da física.

Deu-se assim uma revolução; nasceu um princípio novo e poderoso, um esquema teórico geral no qual devem enquadrar-se todas as leis naturais. Se qualquer nova lei for formulada, perguntamos agora: satisfaz essa lei o princípio da teoria da relatividade? Isto é, é essa lei a mesma para todos os *sistemas* em movimento uniforme relativo? Ou, matemàticamente, é essa lei invariável perante a transformação de Lorentz (que reconhece o carácter relativo, não só do espaço, mas também do tempo)? Se aplicarmos este critério às leis da teoria de Maxwell, como fez Einstein no seu trabalho, verificaremos que a teoria de Maxwell, que rege os fenómenos das ondas electromagnéticas, é uma teoria admissível porque satisfaz o princípio da *invariância*, isto é, a estrutura das equações de Maxwell não mudam perante a transformação de Lorentz.

E a respeito da mecânica de Newton? Não é invariante segundo a transformação de Lorentz; só o é segundo a transformação de Galileu. Por esta razão, foi necessário edificar uma nova mecânica: uma mecânica que se pudesse aplicar aos corpos movendo-se a grande velocidade e que fosse invariante em relação à transformação de Lorentz. Esta física moderna, que satisfizesse o novo princípio da relatividade, o princípio da invariância no que diz respeito à transformação de Lorentz, foi edificada por Einstein no seu famoso tratado publicado em 1905. Os dois ramos principais da física, as teorias da mecânica e do campo, foram relacionadas, não pela suposição de um éter, mas pelo novo princípio da relatividade de Einstein. Deve satisfazer tanto os princípios mecânicos como os de campo, constituindo a mecânica clássica uma boa e útil aproximação, em relação à nova mecânica, sempre que as velocidades forem pequenas em comparação com a velocidade da luz.

O novo conjunto relativista tornou-se um dos mais importantes guias da física moderna. As consequências das ideias de Einstein no presente século foram das maiores que homem algum jamais trouxe à ciência. Da teoria da relatividade, formulada em 1905, foi possível abrir um caminho para o progresso, e grande parte desse caminho foi percorrido, mais tarde, sob a orientação de Einstein. Tornou-se impossível uma retirada para as antigas posições da física clássica. A influência da teoria da relatividade sobre todo o desenvolvimento da física moderna não pode ser exagerada; mas a sua influência não se limita apenas à física moderna, pois que a teoria da relatividade influenciou toda a nossa vida moderna. Influenciou já os nossos pontos de vista filosóficos sobre espaço e tempo e,

com certeza, influenciará o futuro desenvolvimento da técnica.

Um princípio em vez de dois

Porque nos temos referido à velocidade da luz, ou a velocidades menores do que a da luz? A razão é que, de acordo com a teoria da relatividade, não pode haver velocidade maior do que a da luz. De acordo com a mecânica clássica, se uma partícula se move a uma certa velocidade no autocarro da 5.ª Avenida, nesse caso a sua velocidade em relação ao observador da parte de fora é igual à sua velocidade em relação ao autocarro mais a velocidade do autocarro. Deste modo, qualquer velocidade pode ser aumentada. Mas, como verificámos, a lei clássica da adição de velocidades é incompatível com os princípios sobre que se baseia a teoria da relatividade. De facto, se a luz se propaga com a velocidade *c* em relação ao autocarro, a sua velocidade em relação ao exterior (ou seja, ao observador na 5.ª Avenida) será a constante *c*, quer o autocarro se mova depressa quer devagar. A lei clássica da adição de velocidades deve ser transformada e essa transformação pode ser deduzida da transformação de Lorentz, que substitui a transformação clássica de Galileu.

Existe uma dedução importante da teoria da relatividade que Einstein refere no seu primeiro trabalho e à qual volta mais tarde num pequeno trabalho publicado no volume seguinte de *Annalen der Physik*. Eis o seu título: «Depende a Inércia de um Corpo da sua Energia?». Se eu dissesse que as ideias contidas neste tratado abalaram o mundo, não estava exagerando, pois, pela primeira vez, encon-

tramos uma formulação teórica de um fenómeno, possìvelmente novo, que abriu grandes perspectivas à ciência e à técnica, tanto na guerra como na paz. Este trabalho afirma, em resumo: o uso da energia atómica é, em princípio, possível. Quarenta anos mais tarde o trabalho de grande número de cientistas demonstrou que o uso da energia atómica é possível na prática. As fotografias da explosão no deserto do Novo México e a devastação de Hiroshima demonstraram, fora de qualquer dúvida, a veracidade do raciocínio. É uma amarga ironia que as sementes para a futura utilização da energia atómica tenham sido semeadas pelo homem mais pacífico deste mundo, por um homem solitário que detesta a violência e despreza a força bruta.

Einstein demonstrou que o uso da energia atómica é teòricamente possível, mas ninguém, nem mesmo Einstein, soube se seria alguma vez pràticamente possível. Só há pouco foi possível sabê-lo, e qualquer pessoa poderia imaginar que a utilização da energia atómica era, na verdade, apenas teórica. Neste caso, o nome de Einstein não estaria ligado à bomba atómica, e pouco à técnica. Mas, da mesma maneira, o seu nome não deixaria de estar ligado, duma forma extraordinária, à história da civilização. A criação da teoria da relatividade indica o nascimento da física moderna; trouxe uma mudança profunda às nossas ideias filosóficas básicas e uma completa revisão das bases sobre as quais a ciência moderna está construída.

Na parte final do pequeno trabalho de Einstein há as seguintes linhas:

> A massa dum corpo é uma medida da sua energia. Se a sua energia muda de L, a sua massa muda de $L/9.10^{20}$, se a energia é medida em ergs e a massa em gramas.

> Não será possível, para corpos com um conteúdo de energia variável em alto grau (como, por exemplo, os sais de rádio), fazer-se com êxito uma verificação dessa teoria? (*in* «Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?», *Annalen der Physik*, vol. XVIII, 1906).

Nestas palavras não só há uma importante conclusão tirada da teoria da relatividade, como também é prevista a possibilidade da sua confirmação.

Pode tal conclusão ser deduzida dos dois princípios abstractos em que a teoria da relatividade está baseada? Pode, pois que não há novos princípios envolvidos.

Dividamos a nossa tarefa de explicar esta dedução fundamental em duas partes: em primeiro lugar, desejamos mostrar todas as suas consequências e, em seguida, examinaremos a sua ligação com os princípios da teoria da relatividade.

O físico clássico do século XIX acreditava em duas leis da conservação: 1) a lei da conservação da massa; 2) a lei da conservação da energia. A lei da conservação da massa afirma que é possível aquecer um corpo, deformá-lo, transformá-lo quìmicamente, mas a massa total mantém-se a mesma. A energia, por outro lado, é algo que produz trabalho, mas não tem massa. Numa máquina a vapor, por exemplo, o calor é transformado em trabalho, mas a massa não interessa para o caso porque, de acordo com a física clássica, o calor não tem nem peso nem massa. O Sol emite radiações no espaço, uma pequena fracção das quais cai na Terra, trazendo consigo energia irradiante, que se transforma em calor ou na energia química conservada pelas plantas. Mas esta radiação não transporta massa. Deste modo, temos, lado a lado, duas grandezas: massa e energia. Para a física clássica parecem algo distintas, não só qualitativa como

quantitativamente. A massa é medida em gramas, mas a energia, como trabalho, é medida em ergs. (1 erg é igual ao trabalho produzido por uma força de 1 dyn quando percorre 1 cm. 1 dyn é a força que dá a 1 g a aceleração de 1 cm por segundo num segundo. Tudo isto são definições técnicas. Basta saber que 1 erg é uma unidade pequena de trabalho e energia.) Se se aquecer um copo de água, a sua temperatura e a sua quantidade de calor variam. Mas muda a massa deste copo de água? O físico clássico diria que não.

Mas a teoria da relatividade leva a uma resposta totalmente diferente. Conclui que a energia não é destituída de peso, que tem uma massa definida. Se a quantidade de energia muda, também muda a massa. A energia tem massa e a massa tem energia. Não existem dois princípios da conservação. Há um único, e é o princípio da conservação massa-energia. Massa e energia são coisas tão diferentes entre si como dólares e centavos do dólar, mas, da mesma forma que é possível transformar centavos em dólares e vice-versa, é possível, pelo menos em princípio, transformar massa em energia e energia em massa. A teoria da relatividade fornece a taxa de câmbio da transformação. O facto de esta taxa de câmbio ser muito baixa manteve o princípio da conservação oculto da ciência e fez que a energia parecesse não ter peso, provocando assim o uso de dois princípios em vez de um.

A transformação da massa, prevista pela teoria da relatividade, quando se aquece um copo de água é tão pequena que não poderia ser descoberta mesmo pesando na balança mais sensível. Imaginemos que se acrescentam alguns ergs de energia a um copo de água ou a qualquer outro sistema. Quantos gramas pesa essa energia, ou em quantos gramas se aumentou a massa original? A resposta é: muitíssimo pouco. Ainda menos do que se juntarmos um desvalorizado dracma

à conta do banco de um milionário. A energia representa uma moeda completamente sem valor em comparação com a massa, expressa em gramas. Mas é uma moeda fluida que se pode usar para trabalho. A massa está acumulada em moeda de valor muito alto, que só agora começamos a aprender a usar, transformando os seus recursos tremendos, até aqui inacessíveis, na moeda líquida, mas grandemente desvalorizada, da energia. Assim, a troca entre a moeda forte da massa e a moeda desvalorizada da energia é-nos dada por um número imenso: 1 g é igual a 900 000 000 000 000 000 000 ergs!

1 g medido em ergs é igual à velocidade da luz vezes a velocidade da luz, se a velocidade for expressa em centímetros por segundo. (Expressa assim, a velocidade da luz é igual a 30 000 000 000 cm por segundo).

Assim, a massa de energia em gramas obtém-se dividindo essa energia em ergs pelo tremendo número que acabámos de citar. Para dar um exemplo: a quantidade de calor necessária para converter 1 000 t de água totalmente em calor não chegaria a pesar a trigésima parte de 1 g. É devido a esta desprezível massa de energia que durante muito tempo ela foi considerada sem peso.

Em resumo, a teoria da relatividade regeita a distinção entre massa e energia. Cada unidade de massa representa uma provisão enorme de energia e cada unidade de energia possui uma massa diminuta. Os dois princípios da conservação da massa e da energia foram, pela teoria da relatividade, combinados num só, a que poderemos chamar *princípio da conservação da massa e da energia.* O câmbio de troca entre estas duas quantidades está estabelecido e os dois princípios, massa e energia, são unificados. São duas palavras para a mesma realidade básica.

Como resulta a relação entre massa e energia dos princípios da teoria da relatividade? Embora não possamos deduzir aqui este resultado, já dissemos bastante para tornar plausível a grande dedução de Einstein.

Os fundamentos da mecânica clássica baseiam-se na lei do movimento de Newton. Para mudar uma velocidade, para produzir uma aceleração, é necessária força. Por outro lado, a massa, como dissemos, é considerada na mecânica clássica como algo de constante e inalterável. Se se desejar aumentar a velocidade de uma dada massa em 1 m por segundo, é preciso exercer uma determinada força, não fazendo a menor diferença que a velocidade seja zero ou muito próxima da da luz. Não é a velocidade que interessa, mas sim a aceleração. Quanto maior for a massa maior será a inércia, ou seja, a resistência do corpo à aceleração. Este facto é tão simples e familiar como o de ser mais difícil acelerar uma pedra grande do que uma pequena. De acordo com a física clássica, a inércia (isto é, a massa) não muda com a velocidade. É tão fácil ou tão difícil aumentar a velocidade de um corpo em 1 m por segundo quando esse corpo se movimenta com a velocidade da luz como quando está em repouso. De acordo com a teoria da relatividade, é óbvio que isto não pode ser assim, pois não admite velocidades maiores do que a da luz. Mas nesse caso, para explicar a impossibilidade da aceleração ilimitada, teremos de concluir que a massa aumenta com a velocidade! De facto, se a velocidade for quase igual à da luz, a massa inerte deve ser tão grande que força alguma pode fazer que a sua velocidade seja maior do que a da luz. De acordo com a teoria da relatividade, a massa deve-se tornar infinitamente grande quando a velocidade do corpo se aproximar da da luz! Como poderíamos, doutro modo,

interpretar o facto de corpo algum poder ser acelerado até uma velocidade maior do que a da luz?

De acordo com a física clássica, a massa é invariável e não depende da velocidade; mas é variável e depende da velocidade na teoria da relatividade. Conhecemos não só a lei qualitativa, mas também a quantitativa dessa variação.

De acordo com a física clássica, um corpo em movimento tem energia cinética, pois que se move. Esta energia, como qualquer energia, não tem peso, ou, para dizer o mesmo de outra maneira: a massa de um corpo em movimento não varia.

Mas na teoria da relatividade a massa varia com a velocidade ou, para pôr isto de uma maneira diferente, a energia «cinética» deve ter massa, ainda que pequena. E a taxa de câmbio entre a massa e a energia cinética é a mesma acima mencionada: a taxa que ligava a moeda desvalorizada da energia à moeda forte da massa. Einstein mostrou também que a relação fundamental massa-energia é verdadeira, não só para a energia cinética, mas para qualquer tipo de energia.

Estamos vendo quão longe se estendem as ramificações da teoria da relatividade. Desde que iniciámos a nossa exposição, tratámos de muitos domínios, e podemos agora ver uma física nova surgindo das deduções dos seus princípios básicos. Os alicerces desta nova física foram estabelecidos por Einstein, com grande clareza, em dois trabalhos — e em menos páginas do que as que estamos gastando aqui para indicar alguns dos seus resultados.

«Um paradoxo? Um paradoxo! Um paradoxo verdeiramente genial!»

Einstein, desde os seus 15 ou 16 anos (ele mesmo mo disse várias vezes), andava intrigado com o seguinte

problema: o que acontecerá se alguém tentar apanhar um raio luminoso? Pensou durante anos neste problema. A sua solução conduziu à teoria da relatividade. Vemos neste exemplo algumas características importantes do génio de Einstein. Primeiro, e acima de tudo, há a capacidade para se maravilhar. Em segundo lugar, há a aptidão para meditar durante muitos anos sobre o mesmo problema, até que a escuridão se transforme na luz da compreensão. E, em terceiro lugar, há a aptidão para formular experiências simples e ideais, experiências essas que nunca podem ser postas em prática, mas que, se forem analisadas com exactidão, esclarecem e transformam a nossa compreensão do mundo que nos rodeia.

De facto, no exemplo do homem que apanhe e corra com um raio de luz vemos o grande enigma que conduziu à teoria da relatividade. Para esse homem, visto que se desloca uniformemente, todos os fenómenos deveriam ser iguais aos do homem parado. Mas, por outro lado, ele permanece sempre deante da onda luminosa, e para ele a luz está parada. Algo aparentaria oscilar, mas a onda não se propagaria. A teoria da relatividade e a rejeição da transformação de Galileu é a solução para este enigma. Nenhum corpo material pode andar com a velocidade da luz. Para qualquer observador, a velocidade da luz continuará tendo o valor constante *c*. Ninguém pode tentar alcançar com êxito um raio de luz. Como já conhecemos a importância da simultaneidade na teoria da relatividade, observemos mais de perto o princípio dos relógios que mudam o seu ritmo e consideremos outras conclusões que daí podem ser tiradas. Voltemos ao exemplo do autocarro rodando ao longo da 5.ª Avenida. Se em dado momento, durante a viagem, o motorista verificar que o seu relógio tem a mesma hora que o relógio mais próximo no exterior, verificará mais tarde que o

seu relógio difere de vários relógios da 5.ª Avenida pelos quais passa; o ritmo do seu relógio é mais lento, e quanto maior for a velocidade mais lento será o ritmo. O relógio em movimento estaria parado se a velocidade do autocarro fosse a da luz. Mas não esqueçamos que estamos comparando o ritmo de *um* relógio no autocarro com o ritmo de *vários* relógios na 5.ª Avenida.

Parecia tão fantástico que a conclusão acima referida pudesse ser deduzida da teoria da relatividade, e mais especialmente da transformação de Lorentz, que houve quem começasse a contar piadas a esse respeito, convencido de que a teoria da relatividade é absurda se é possível tirar dela tais conclusões. Estas objecções foram muitas vezes formuladas na forma do *paradoxo dos gémeos*. Imaginemos que dois gémeos nascem na 5.ª Avenida e que um é colocado no autocarro, enquanto o outro é deixado na rua. Agora o autocarro roda com grande velocidade e um relógio movendo-se com ele tem um ritmo lento em comparação com os relógios da 5.ª Avenida. Podemos imaginar que a 5.ª Avenida se prolonga no espaço, que um dos gémeos inicia a sua viagem com uma velocidade quase igual à da luz e que a viagem no espaço é longa. O coração do gémeo no autocarro pode ser considerado como um relógio e bate num ritmo lento, comparado com o dos corações humanos por que passa. Em qualquer parte, muito longe, o autocarro pára e regressa à Terra. Na sua viagem de regresso continua a economizar tempo, visto que a diminuição do ritmo depende apenas da velocidade, e não do sentido do movimento. (Estamos supondo que o movimento é uniforme, tanto da Terra para fora como no sentido dela. A única não-uniformidade verifica-se quando o autocarro dá a volta, mas a influência desse movimento não-uniforme pode ser considerada

tão pequena quanto queiramos, porque poderemos ir tão longe e economizar tanto tempo quanto desejarmos). Deste modo, o gémeo encontra-se de novo com o irmão. Mas, em virtude da teoria da relatividade, o que viajou está ainda na sua juventude, tem os dentes todos, assim como o cabelo, enquanto o outro é um velho quase moribundo. Os dois irmãos gémeos terão um aspecto completamente diferente, de acordo com a teoria da relatividade, pois o que acabámos de dizer é uma conclusão dos seus dois princípios. Qual a resposta para o paradoxo dos dois gémeos?

Este paradoxo tem sido muitas vezes lançado contra a teoria da relatividade para mostrar o absurdo das suas conclusões. Mas, na verdade, elas não contradizem a experiência, mas apenas as noções tradicionais de tempo absoluto. Nunca foi possível fazer a experiência. Se o fosse, a resposta seria, estou convencido, aquilo que a teoria da relatividade prevê.

Em todo o caso, seria convincente ter uma experiência directa mostrando que um relógio em movimento muda o seu ritmo. Há uma quantidade enorme de provas a favor da teoria da relatividade, mas de tipo indirecto. Não é fácil uma verificação experimental directa, visto que, como é sempre o caso com a teoria da relatividade, quaisquer divergências entre a mecânica clássica e a teoria da relatividade só podem ser descobertas se a velocidade se aproximar da da luz. Mesmo assim, em 1938, muito depois de a teoria da relatividade ter sido formulada, foi feita por Ives uma experiência interessante, mostrando directamente a mudança de ritmo com a velocidade. Esta experiência foi realizada com o átomo do hidrogénio, o qual pode ser usado como um relógio natural cujo ritmo é revelado através do seu espectro. A engenhosa experiência de Ives mostrou que o átomo de hidrogénio não só altera o seu ritmo, mas também, o que é mais impor-

tante, que essa alteração é exactamente a prevista pela teoria da relatividade.

Como vimos, a revolução começada pela teoria da relatividade afecta os nossos princípios tradicionais de tempo e massa. Um outro princípio transformado duma forma radical é o de comprimento. Uma vez mais nos contentaremos com a descrição do resultado já deduzido.

Regressemos ao nosso autocarro da 5.ª Avenida. Como já dissemos, este autocarro, estando parado, tem o comprimento de quatro quarteirões. Mas qual o seu comprimento quando em movimento? Devemos desconfiar dos nossos preconceitos e ter cuidado ao afirmar o que, de começo, parece óbvio: «Evidentemente, tem sempre quatro quarteirões de comprimento», como teria dito o físico clássico; sejamos cautelosos e perguntemos de preferência: «Que queres dizer quando perguntas qual o comprimento do autocarro enquanto em movimento?». Eu sugeriria a seguinte resposta: «Sabes que o autocarro se move, digamos, com uma velocidade igual a metade da da luz. Por isso, estacionarias com um cronómetro e pô-lo-ias em movimento quando a parte da frente do autocarro passasse por ti e pará-lo-ias quando em tua frente passasse a sua retaguarda. Multiplicarias esse diminuto espaço de tempo pela velocidade do autocarro, e terias o seu comprimento quando em movimento. Podes pensar noutros métodos, mas não acharás nenhuma experiência razoável que não implique o uso de um relógio. Todo o tempo é relativo, e os relógios, como vimos, alteram o seu ritmo quanto estão em movimento». Deste modo, não seria de espantar que o resultado desta experiência mostrasse que o comprimento também é relativo. Na verdade, neste nosso caso, em que o autocarro roda a uma velocidade que é metade da da luz, o seu comprimento deveria ser

encurtado de cerca de 15 %. As suas dimensões anular-se-iam no sentido do movimento se a velocidade fosse a da luz. O comprimento é, como o tempo, relativo.

Tentei esboçar aqui as mudanças revolucionárias causadas pelos dois trabalhos de Einstein. Qual foi o efeito destas ideias novas? A princípio quase nenhum. Hoje em dia os resultados importantes talvez sejam reconhecidos mais ràpidamente, e um novo estudo, de natureza revolucionária, produz muitas vezes uma enchente de outros trabalhos. Estes trabalhos são escritos por homens que seguiram em pormenor as suas ideias e as desenvolveram matemàticamente. Mas este grande número de trabalhos não veio logo em seguida aos artigos de Einstein. Começou cerca de quatro anos depois — muito tempo, na verdade, para reconhecimento científico. Mas sei que houve físicos que, no entretanto, leram o trabalho de Einstein com grande atenção e viram nele o nascimento de uma ciência nova. O meu amigo Prof. Loria contou-me que o seu mestre (e que grande mestre ele era!), o Prof. Witkowski, em Cracóvia, leu o trabalho de Einstein e exclamou para Loria: «Nasceu um novo Copérnico! Leia o trabalho de Einstein». Quando, mais tarde, o Prof. Loria encontrou o Prof. Max Born num congresso de física, falou-lhe de Einstein e perguntou-lhe se tinha lido o artigo. Descobriu-se que nem Born nem ninguém ouvira falar de Einstein. Foram à biblioteca, tiraram da estante o volume XVII dos *Annalen der Physik* e começaram a ler o artigo de Einstein. Max Born reconheceu imediatamente a sua grandeza e, ainda, a necessidade de generalizações formais. Mais tarde, o próprio trabalho de Born sobre a teoria da relatividade tornar-se-ia uma das contribuições mais importantes neste campo da ciência.

Foi só em 1908 ou 1909 que a atenção dum bom número de cientistas se voltou para os resultados de Einstein. Uma das circunstâncias que contribuíram para tornar a teoria da relatividade mais geralmente conhecida foi a conferência de Minkowski *Espaço e tempo,* em 1908. Herman Minkowski, matemático famoso, era então professor em Göttingen. Esta conferência famosa, que ele proferiu no 18.º Congresso da Associação dos Cientistas e Médicos Alemães, foi, salvo erro, a sua última conferência pública, pois morreu pouco depois, prematuramente. As primeiras palavras da conferência de Minkowski constituíram uma declaração profética da profunda influência que as ideias de Einstein deviam exercer sobre o pensamento moderno:

> Meus senhores! Os princípios de tempo e espaço que desejo desenvolver perante vós cresceram no solo das experiências físicas. Nisto reside a sua força. A sua tendência é radical. De agora em diante, espaço em si e tempo em si deveriam cair na sombra, e só uma união de ambos deveria reter a sua independência.

O génio matemático de Minkowski pôs as ideias de Einstein numa nova forma geométrica que revelou completamente a sua beleza e simplicidade. Por vezes ouvimos que «o tempo é a quarta dimensão da teoria da relatividade» e ficamos impressionados com o tom místico destas palavras. Mas nada nelas é místico. Os acontecimentos no mundo devem ser descritos com quatro números, dos quais três se referem à posição no espaço e um à posição no tempo. Minkowski mostrou que é muito melhor não considerar apenas espaço como fundo para os acontecimentos, mas sim espaço-tempo. A divisão desse fundo espaço-tempo em espaço e tempo depende do *sistema* de observação. Não podemos falar mais aqui do trabalho

matemático de Minkowski sobre a teoria da relatividade, pois não é possível descrever formalismo matemático sem o uso de símbolos matemáticos.

Entre 1908 e 1918 a teoria da relatividade tornou-se conhecida entre físicos e matemáticos. Muitos deles ficaram conscientes de que se produzira uma revolução. Mas continuou a haver tanto entusiasmo como dúvida. Só mais tarde, porém, ambas as reacções se manifestaram com mais força do que nunca na história da ciência.

CAPÍTULO IV

A segunda revolução einsteiniana

O elevador caindo

Completara-se a primeira revolução einsteiniana. Talvez que Einstein fosse a pessoa menos satisfeita com os seus resultados. Ele verificou imediatamente que a revolução não tinha progredido suficientemente e que em física continuava a haver profundas dificuldades.

Bastantes anos mais tarde eu disse a Einstein, em Princeton: «Creio que a teoria da relatividade restrita teria sido formulada sem demora se o senhor não o tivesse feito. Já era tempo para isso». E Einstein respondeu: «Sim, é verdade, mas o mesmo não se passa com a teoria da relatividade generalizada. Duvido se ela seria já conhecida agora». Parece-me que esta resposta caracteriza bem o papel de Einstein na segunda revolução.

Para antecipar o que aconteceu, queremos apresentar dois termos usados hoje na discussão da teoria da relatividade: *restrita* e *generalizada*. Referir-nos-emos à *teoria da relatividade restrita* quando falarmos de ideias que descrevemos no capítulo anterior e à

teoria da relatividade generalizada quando falarmos acerca do desenvolvimento posterior, de que em seguida nos vamos ocupar.

A teoria da relatividade restrita andava no ar. Eram conhecidas dos físicos as contradições que levantava, pois que as manchas no corpo da física eram visíveis para muita gente; mas não acontecia o mesmo com a teoria da relatividade generalizada. Einstein era o único homem que continuava a ver contradições e dificuldades e trabalhou para que fossem removidas. No caso da teoria da relatividade restrita, a doença era conhecida; sòmente o remédio era desconhecido. A teoria da relatividade generalizada assemelhava-se mais ao remédio para uma grave doença que só Einstein e, até certo ponto, um filósofo de Viena, Ernst Mach, viam. Até mesmo Planck, o famoso Planck, que iniciara o desenvolvimento da teoria quântica, disse a Einstein: «Se agora está quase tudo resolvido, porque se preocupa com estes problemas?». E, apesar de tudo, Einstein preocupou-se, completamente só. Há uma diferença de oito anos entre as teorias da relatividade restrita e da relatividade generalizada; oito anos de pensamento constante, que, finalmente, produziram fruto na nova solução do grande problema da gravitação.

Tenho deante de mim um trabalho que Einstein escreveu em 1911, quando era professor em Praga. Foi publicado nos *Annalen der Physik* com o título «Sobre a influência da gravitação na propagação da luz». É um trabalho interessantíssimo, visto que, mais do que qualquer outro, revela a marcha do pensamento de Einstein. Em parte, está errado: contém semiverdades, conjecturas, uma consciência dramática de que a verdade, ainda que muito diferente, não está longe. Reflecte também a paixão de Einstein por experiências ideais e a sua habilidade infantil em se maravilhar

perante coisas simples — coisas tão simples e familiares que passam completamente despercebidas a outros.

Desde Galileu que os físicos sabiam que todos os corpos caem com a mesma aceleração. Todos os corpos deixados cair da mesma altura alcançarão o solo ao fim do mesmo intervalo de tempo, se abstrairmos a resistência do ar. Ninguém no nosso século, com excepção de Einstein, se preocupou com esta lei. A experiência demonstrou, tanto quanto é possível avaliar, que esta lei é rigorosamente válida. Não existe a menor diferença entre a aceleração de vários corpos que caem no mesmo lugar da Terra.

A educação aniquila a nossa capacidade para o maravilhoso. Só os génios conseguem permanecer inocentes. Nos últimos trezentos anos da ciência foi Einstein o primeiro que viu nesta igualdade de aceleração uma importante indicação. Podemos imaginar um mundo em que esta lei não é válida; um mundo em que elefantes caem tão lentamente que quase pairam no espaço, enquanto bebés caem com uma aceleração perigosíssima em direcção à Terra. Mas o campo de gravitação da Terra obriga os elefantes e os bebés a caírem com a mesma aceleração. Que significa pois esta importante indicação? No quadro da mecânica clássica apresenta-se como um mero acidente!

Einstein contou-me como, desde a sua juventude, reflectia sobre o homem que perseguia o raio de luz e sobre o homem encerrado num elevador caindo. A imagem do homem perseguindo o raio de luz levou à teoria da relatividade restrita e a imagem do homem dentro do elevador caindo à teoria da relatividade generalizada. No artigo de Einstein que acabei de citar encontramos, implìcitamente, a figura de um homem no

elevador caindo. Vamos agora falar sobre estas imagens.

Imaginemos um arranha-céus. Um elevador é levado tão alto quanto possível e depois solto, de modo a cair *livremente* com um movimento uniformemente acelerado. Os observadores dentro dele não temem a colisão que se aproxima, mas fazem corajosamente a sua investigação. Para tornar esta imagem mais perfeita, imaginemos que o elevador é feito de vidro, de forma que alguns observadores no exterior possam olhar para dentro dele e que observadores dentro e fora do elevador possam comparar entre si as suas notas. Há uma semelhança entre a técnica de raciocínio que usámos anteriormente e a que estamos usando agora. Temos outra vez dois *sistemas*, a saber, a Terra e o elevador. Mas existe também uma diferença fundamental. O movimento relativo dos dois *sistemas* já não é *uniforme;* agora é *acelerado*. Apesar disso, o nosso método de explicação continuará a ser semelhante. Uma vez mais, faremos perguntas aos observadores dentro e fora do elevador, e ainda outra vez uma simples ponderação nos conduzirá a conclusões de grande alcance.

A rapariga que faz serviço no elevador usa pó de arroz e *bâton*. Que acontece ao *bâton* e à caixa de pó de arroz? Eis a resposta: considerando a situação dentro do elevador, a caixa de pó de arroz e o *bâton* continuam em repouso onde ela os largou. Porque não? Todos os objectos caem com a mesma aceleração em relação à Terra. Portanto, estão, em relação uns aos outros, em repouso. Os objectos deixados cair no elevador que cai livremente nem caem no chão nem se elevam até ao tecto. Ficam no lugar em que foram soltos. Que acontece quando a rapariga empurra a caixa de pó de arroz? Nesse caso a caixa de pó de

arroz move-se com *movimento uniforme* no sentido em que foi empurrada, até que um choque com a parede do elevador a faz parar. Depois de várias experiências, o observador dentro do elevador formulará a seguinte lei: todos os corpos no meu *sistema* ou permanecem em repouso ou se movem uniformemente, até que são interrompidos pelas forças do meu *sistema,* ou pelas paredes do mesmo, ou pelo fim do nosso mundo, que se avizinha, isto é, o choque do elevador contra o fundo. Isto é *quase* a lei da inércia de Newton, que aprendemos na escola. Eu disse *quase* porque nas escolas não falamos nem da limitação feita pelas paredes nem do fim do mundo.

Devemos fazer aqui uma interrupção para sublinhar a importância da imagem que estamos usando.

De acordo com a lei da inércia de Newton (a primeira das três famosas leis de Newton), todos os corpos se encontram em repouso ou em movimento uniforme, a menos que sejam perturbados pela acção de forças exteriores. É verdadeira esta lei? Se deixarmos cair um corpo sobre a Terra, não fica em repouso; cairá no chão. A mecânica de Newton ensina que, neste caso, a lei da inércia não é válida porque existe uma força no nosso *sistema:* a força da gravidade. Para se evitarem os efeitos desta força da gravidade podem-se fazer rolar algumas esferas num plano horizontal, uma mesa lisa, por exemplo. Uma vez mais, ao fim de algum tempo, as esferas pararão. Então o mecânico newtoniano explicará que elas não se moviam uniformemente por causa do atrito; para provar a lei da inércia também é necessário anular o atrito. Mas há pior ainda. Imaginemos que fazemos as nossas experiências num carrocel. Aqui cada corpo é lançado para fora, para longe do centro. Deste modo, as leis da mecânica newtoniana não são válidas num

carrocel, pois que um observador verificará que um corpo não permanece em repouso, mas tenta tanto quanto possível afastar-se do centro. Mas se a lei da inércia não é válida num carrocel, também não é válida na Terra, que também roda.

Creio que temos razão em estar surpreendidos por causa disto e em fazer ao mecânico newtoniano uma pergunta:

«Por amor de Deus, onde *está* afinal o teu *sistema* em que a lei da inércia é válida?».

Se ele for honesto, dirá:

«Não sei. É preciso procurá-lo. A Terra é por vezes uma boa aproximação de tal *sistema* e outras vezes não. Depende do teu problema e do grau de precisão das tuas experiências. Uma coisa sei, e é que, se achares semelhante *sistema*, terás uma infinidade deles, porque qualquer outro *sistema* com movimento uniforme relativo ao bom *sistema* é igualmente um bom *sistema*».

A nossa discussão trouxe um ponto fraco à doutrina da mecânica clássica. Sabemos as leis, mas não conhecemos o *sistema* a que se referem. Como a saída usual duma dificuldade é a invenção de um nome novo, podemos chamar a um *sistema* em que as leis da mecânica são válidas um *sistema inerte;* mas não podemos dizer que este *sistema* ou aquele é um *sistema* inerte. Só teòricamente sabemos o que é um *sistema* inerte: é aquele em que as leis da mecânica são válidas. Mas não sabemos se semelhantes *sistemas* existem.

Houve uma altura em que criticar Newton significava mau gosto — quase um crime. Mesmo na segunda metade do século XIX era necessária grande independência de espírito para encarar criticamente a estrutura de Newton, grandiosa, mas não inultrapassada. O homem que primeiro o fez foi o filósofo vienense

Ernest Mach. Einstein foi influenciado por Mach, apesar de a sua própria crítica ser incomparàvelmente mais penetrante. A ironia do caso reside no facto de na altura em que Einstein removeu estas dificuldades da física Mach ser já muito velho para compreender a importância do trabalho de Einstein.

Voltemos aos nossos observadores no elevador caindo. Como Einstein pôs em destaque, temos neste caso um exemplo de um *sistema quase inerte,* mas não completamente. O seu carácter de inerte é restrito no espaço. O *sistema* não é totalmente inerte porque, mais cedo ou mais tarde, o *bâton,* se impelido, irá de encontro à parede. Não seria solução fazer o elevador cada vez maior, pois sabemos que quaisquer corpos só caem com a mesma aceleração se estiverem no mesmo lugar do espaço, ou na vizinhança imediata desse lugar. Por isso, o nosso elevador não deve ser grande de mais. Assim, o nosso *sistema* de inércia está, evidentemente, restrito no tempo, pois o mundo do observador no interior do elevador acabará devido à catástrofe inevitável da colisão. Chamaremos a tal *sistema,* no género do do elevador, um *sistema quase inerte.* Assim, podemos dizer que a experiência idealizada por Einstein mostrou a existência de um *sistema* quase inerte.

Temos até aqui falado apenas do observador dentro do elevador. O observador no lado de fora tem por agora pouca coisa interessante a dizer. O seu *sistema* não é, evidentemente, um *sistema* inerte devido à força da gravidade. Para ele, o elevador, a rapariga e o *bâton* caem todos com a mesma aceleração no campo de gravidade da Terra.

Notamos no raciocínio de Einstein o aspecto já conhecido: conclusões importantes tiradas de experiências ideais simples. Seguiremos algumas delas.

Temos dois *sistemas* (o elevador e a Terra, com a caixa do elevador) em movimento acelerado relativo. Um *sistema*, o elevador, é quase inerte. Em tal *sistema* as leis da mecânica são quase rigorosamente válidas; não há ali força da gravidade, por ter sido feita desaparecer pelo movimento livre do elevador. (Mas o observador do lado de fora dirá que o seu *sistema* não é inerte devido ao campo gravitacional, em que todos os corpos caem com a mesma aceleração). Olhando através do chão transparente do seu elevador, os que lá estão dentro verão que um corpo enorme vem ao seu encontro. Desconhecendo tudo o que diz respeito às forças da gravidade, e supondo a validade da mecânica newtoniana, verão o movimento acelerado do seu corpo e dirão, horrorizados, que alguma força constante impele este corpo na sua direcção a fim de destruir o seu mundo. Deste modo, estes observadores, num espaço e num tempo limitados, descrevem consistentemente as suas observações, usando para isso a mecânica de Newton e não considerando qualquer campo gravitacional.

Ao discutirmos, anteriormente, a teoria da relatividade restrita verificámos ser possível uma descrição bem fundamentada dos acontecimentos nos dois *sistemas* se esses dois *sistemas* estão em movimento uniforme relativo. A passagem de um *sistema* para outro é dirigida pela transformação de Lorentz. Mas agora temos dois *sistemas* que se deslocam com um movimento acelerado em relação um ao outro. Qualquer passagem de um *sistema* para outro envolve agora o aparecimento de um campo de gravidade num deles e o seu desaparecimento no outro. Assim, se desejarmos alargar as nossas considerações, incluindo *sistemas* cujo movimento relativo não é uniforme, devemos tomar em consideração o importantíssimo fenómeno da gravitação. É o elo que liga *sistemas* em movimento

não uniforme. O campo de gravitação pode ser extinto ou criado (pelo menos localmente) pela escolha de um sistema de referência apropriado. Isto só é verdadeiro porque num campo gravitacional todos os corpos têm a mesma aceleração num dado ponto. Sem esta indicação, que fora ignorada durante trezentos anos, tudo o que tem sido dito aqui não teria tido qualquer significado e a teoria da relatividade generalizada, tal como a conhecemos hoje, teria sido impossível. As nossas simples reflexões mostram-nos que esta ignorada indicação não é acidental, mas fundamental, quando devidamente compreendida; leva-nos mesmo à teoria da relatividade generalizada.

O nosso raciocínio foi simples e nenhuma matemática foi necessária para ele. Mas até estes raciocínios qualitativos levarão a uma nova conclusão, que pode ser confirmada ou rejeitada pela experiência.

Quando tratámos acima da teoria da relatividade restrita, chegámos a uma conclusão muitíssimo importante: achámos a ligação entre massa e energia. Para usar uma frase feita, este resultado levou à maior descoberta depois da do fogo. Partindo agora do nosso exemplo do elevador caindo, chegaremos a uma conclusão que teve um papel importantíssimo: fez que em todo o mundo muitas pessoas prestassem atenção à teoria da relatividade e ao seu autor.

Imaginemos agora dois pequenos furos feitos nas paredes opostas do nosso elevador, pouco mais ou menos à mesma altura. Num destes furos colocaremos uma lanterna e, acendendo-a e apagando-a, emitiremos sinais luminosos para a parede oposta deste elevador. É evidente que, devido ao facto de o elevador caindo livremente ser um *sistema* quase inerte, a luz se propagará em linha recta, com uma velocidade constante. Após um curto intervalo encontrará o furo feito na parede oposta. Este raciocínio é convincente:

Não fizemos mais do que aplicar as leis da propagação da luz, que se consideram válidas para um *sistema* inerte. Mas que se passa com o observador do lado de fora, na Terra, para quem existe um campo gravitacional? Através das paredes de vidro verá o sinal luminoso ir de uma parede até à outra. Mas durante esse curto espaço de tempo (imaginemos que tudo se passa ao retardador) em que o sinal luminoso se move em direcção à segunda parede todo o elevador desce em relação ao observador do lado de fora. Isto é verdadeiro ainda que o elevador inicie a sua viagem descendente precisamente no momento em que o sinal luminoso é lançado. Mesmo que a velocidade inicial do elevador seja zero, a sua aceleração não é zero, e o elevador descerá um pouco enquanto o raio luminoso completa o seu trajecto em direcção à parede oposta. A luz parecerá que deixa o elevador num nível mais baixo do que aquando da sua entrada.

Que dirá o observador colocado no exterior? Dirá, evidentemente, que o raio luminoso se curva num campo de gravitação — que o campo de gravitação deforma a linha recta da trajectória de um raio luminoso. Na verdade, o observador que conheça a teoria da relatividade restrita não se deve revoltar nem espantar. Ele sabe, pela teoria da relatividade restrita, que toda a energia tem massa e toda a massa tem energia.

O raio de luz em movimento transporta consigo energia, e portanto é natural que seja desviado no campo gravitacional, tal como o curso de um projéctil lançado horizontalmente é encurvado num campo de gravitação. Este efeito pode ser muito pequeno, mas um raio luminoso emitido duma estrela e passando pela periferia do Sol seria desviado de modo tal que poderia ser verificado experimentalmente. Durante um eclipse solar é possível fotografar es-

trelas nas proximidades do Sol escurecido. Isto significa que os raios luminosos emitidos dessas estrelas passam perto da periferia solar na sua rota para a Terra. Comparemos uma dessas fotografias com uma fotografia do mesmo sector celeste quando o Sol se encontra noutra posição. Essas duas fotografias devem ser ligeiramente diferentes, porque numa os raios luminosos foram desviados pelo campo de gravitação do Sol e na outra não. No seu trabalho de 1911 Einstein calculou o desvio e previu o fenómeno da curvatura da luz sob a influência dum campo gravitacional. Esse cálculo não era inteiramente correcto. O resultado numérico calculado por Einstein era pequeno de mais. Ele ainda não tinha o conhecimento total da teoria da relatividade generalizada. Foi só ao fim de quatro anos que o conseguiu, quando voltou aos seus cálculos e os melhorou. Mas a previsão desse resultado já aparecera no trabalho de Einstein de 1911. Ele terminara-o com as seguintes palavras:

> Seria urgentemente desejável que os astrónomos se interessassem por esta questão, ainda que as considerações aqui indicadas pareçam insuficientemente fundamentadas ou mesmo arrojadas. Independentemente de qualquer teoria, é-nos lícito perguntar se, com os nossos recursos actuais, podemos achar uma influência do campo de gravitação sobre a propagação da luz. («Uber den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes», in *Annalen der Physik*, 1911).

Que aconteceu com o desafio de Einstein aos astrónomos? Decorreram oito anos. Entretanto Einstein mudara de Praga para Zurique e depois de Zurique para Berlim. Aqui apanha a primeira guerra mundial e aqui termina ele a sua teoria da relatividade generalizada.

A apreciação da teoria da relatividade ia-se pouco a pouco espalhando dos físicos teóricos aos físicos

experimentais, aos astrónomos, aos matemáticos e aos filósofos. Era considerada um assunto extremamente difícil, que requeria o conhecimento de métodos matemáticos que nesse tempo nem eram geralmente conhecidos nem suficientemente desenvolvidos. De facto, a geometria riemanniana e, mais tarde, a chamada *geometria não-riemanniana* foram completamente desenvolvidas devido à necessidade que os físicos tinham de adequados elementos matemáticos de trabalho. A teoria da relatividade estimulou grandemente o desenvolvimento deste ramo da matemática, hoje em dia ensinado em todas as grandes Universidades, muitas vezes mesmo como uma disciplina individualizada.

Foi só depois da guerra que o conhecimento da teoria da relatividade generalizada se estendeu a Inglaterra e a outros países aliados. Em 1919 duas expedições inglesas foram enviadas, uma, para Sobral, no Brasil, e, a outra, para a ilha do Príncipe, na costa de África. Quando a Lua eclipsou o Sol e a noite interrompeu a luz do dia, os cientistas fotografaram as estrelas visíveis nas proximidades do Sol. Então, durante meses, tiraram medidas e fizeram cálculos fastidiosos para descobrir se os raios luminosos se curvam num campo gravitacional e se esse efeito está de acordo, quantitativamente, com o previsto pela teoria da relatividade. Os resultados, quando na altura foram publicados, pareciam confirmar brilhantemente a previsão de Einstein. (Medições feitas mais tarde mostraram uma concordância menor. Mas hoje quase não há dúvidas sobre o facto de os raios luminosos serem desviados pelo campo de gravitação).

Ninguém sabe porquê, mas, de repente, este fenómeno da curvatura dos raios luminosos atraiu a imaginação de todo o mundo civilizado. Qual a

razão deste facto? O cenário romântico? O desejo de refúgio em pensamentos abstractos e de esquecer o gosto amargo da vitória e da derrota? Ou a crença de que esta confirmação do trabalho de um cientista germânico por cientistas ingleses era o princípio de uma nova era em que os homens perdoariam, esqueceriam e trabalhariam juntos? Tenho bem consciência da dificuldade em responder a estas perguntas. Mas o que é inegável é que, de repente, pouco depois de 1920, todo o mundo prestou atenção à teoria da relatividade e ao seu criador. Um homem solitário, que nunca procurara publicidade, tornou-se o homem mais famoso do mundo, o mais louvado e o mais ridicularizado. Ambas as atitudes o deixaram tão indiferente como muitos outros pormenores da vida exterior. Ele talvez fosse a pessoa que menos se apercebia da sua fama repentina.

Três temas

Esboçámos o começo da teoria da relatividade generalizada tal como apareceu no trabalho de Einstein de 1911. Os anos seguintes levaram à sua estrutura final, baseada em novas ideias. Podemos ainda entender estas ideias, mesmo que não sejamos capazes de seguir a sua formulação matemática. Estão elas relacionados com os três temas seguintes:

Primeiro: Gravitação;
Segundo: Invariância;
Terceiro: A relação entre a geometria e a física.

Discuti-los-emos cada um por sua vez.

O maior triunfo da mecânica newtoniana foi talvez a sua solução do problema da gravitação.

Uma lenda idiota conta que Newton viu uma maçã cair duma árvore e foi sùbitamente assaltado pela ideia da força da gravidade. Uma história destas está longe da verdadeira situação. Newton descobriu a teoria da gravitação porque pensou nela, consciente e inconscientemente, durante muitos anos. Um cientista pode, de repente, ver luz, ou, antes, o primeiro clarão de luz, mas só depois de reflexão longa e incessante.

No século XIX o desenvolvimento da astronomia culminou na grande obra de Laplace *Mécanique Céleste*, baseada na lei da gravitação de Newton. No entanto, com o decorrer do tempo, esta lei de Newton parecia ser cada vez menos satisfatória. De acordo com Newton, os movimentos da Terra, da Lua, das estrelas, dos planetas e do Sol são governados pela mesma lei. A Lua move-se em volta da Terra porque a Terra atrai a Lua. A Terra e os outros planetas giram em volta do Sol porque são atraídos por ele, e esta atracção diminui à medida que a distância aumenta, visto que é inversamente proporcional ao quadrado da distância. Esta representação de corpos entre os quais a gravitação opera pertence à teoria de Newton e é o seu ponto culminante.

Mas, como hoje sabemos, o princípio de campo teve, pelo menos, tanto êxito na descrição de fenómenos electromagnéticos e luminosos como o princípio mecânico o teve em astronomia. A teoria de campo trouxe um ponto de vista novo para a física. Para o físico moderno qualquer acção ou força se propaga desde a origem até ao recipiente com uma velocidade finita: a velocidade da luz no caso do campo electromagnético. A força varia tanto em relação com o tempo como com o espaço. É uma noção artificial imaginar que a acção da gravitação, por outro lado, é independente do tempo; que, se uma nova estrela

fosse criada, todo o universo sentiria a sua presença no momento preciso da sua criação. A teoria de campo afirma que as acções se propagam com velocidade finita e que as leis que governam estas mudanças no espaço e no tempo são as leis de campo. Portanto, a teoria newtoniana da gravitação, que não formula essas leis de campo, revela-se insatisfatória e artificial. De resto, só está de acordo com o quadro da mecânica clássica, em que espaço e tempo são absolutos e onde se supõe a existência dum *sistema* de inércia. Mas agora sabemos que o tempo não é absoluto. Mesmo que o tempo não interesse num determinado *sistema* de inércia, deve interessar noutro *sistema* de inércia, de acordo com a transformação de Lorentz. A antiga lei de Newton serve apenas para o quadro estreito da mecânica clássica, mas não serve para o amplo quadro da teoria da relatividade restrita. Além disso, a lei da gravitação de Newton pressupõe a existência de um *sistema* de inércia, apesar de a mecânica clássica não ser capaz de nos dizer onde se encontra tal *sistema*. Posto perante um resultado que contradiz a observação, um adepto da mecânica clássica tem duas alternativas: ou diz que as leis de Newton não são válidas, ou então que ele escolheu um *sistema* não-inerte. Na verdade, se acreditar na mecânica clássica, não pode aceitar a primeira explicação, que afirma não serem válidas as leis de Newton. Mas então perde completamente o sentido o problema de confirmar ou regeitar as leis de Newton.

As críticas aqui discutidas são devidas em parte a Mach e em parte a Einstein. Resumamo-las:

A lei da gravitação de Newton admite a existência de um sistema de inércia.

A lei da gravitação de Newton não está de acordo com o quadro da teoria da relatividade restrita.

A lei da gravitação de Newton não é a lei de um campo gravitacional que mude no tempo e no espaço.

Na lei da gravitação de Newton a igualdade das acelerações num dado ponto do espaço aparece como um acidente ao qual se não deve dar grande significado.

*

Quatro objecções, todas elas graves!

A teoria da relatividade generalizada atacou o problema da gravitação duma forma inteiramente nova e, com um golpe audacioso, removeu todas essas dificuldades. Como isto foi feito, é uma outra questão, a que não é fácil responder. No entanto, tentaremos explicar algumas das novas e revolucionárias ideias em que Einstein baseou a sua teoria da relatividade generalizada.

A teoria da relatividade restrita alarga o âmbito da física clássica. A teoria da relatividade generalizada, por seu turno, alarga o âmbito da teoria da relatividade restrita; pode ser usada sempre que as forças da gravitação não possam ser ignoradas. Podemos derivar a teoria da relatividade restrita do ponto de vista superior da teoria da relatividade generalizada se as forças da gravitação puderem ser ignoradas. Dentro do elevador caindo temos um *sistema* que, até certo ponto, é quase o sistema de inércia da teoria da relatividade restrita. Mas ao fazermos medições em vastas áreas, durante longos períodos, não podemos admitir a validade da teoria da relatividade restrita dentro dum elevador gigante caindo.

Por isso subimos cada vez mais para nos libertarmos de um cada vez maior número de restrições. A estrada tornar-se-á mais e mais difícil, mas a cada

passo em frente devemos poder reter as vantagens do nosso ponto de vista antigo.

Se quisermos achar uma nova teoria da gravitação livre das fraquezas da anterior, devemos-nos lembrar, e isto é importante, da enorme riqueza de experiências satisfatòriamente explicadas pela antiga teoria. A nova teoria, lògicamente mais consistente e mais simples, deve explicar igualmente os factos conhecidos. A Terra move-se em volta do Sol numa trajectória com a forma duma elipse. Isto resulta da lei do movimento de Newton e da sua teoria da gravitação. Resulta também da teoria da gravitação de Einstein. Mas esperamos de facto algumas contradições entre a antiga e a nova teorias. Devem ser pequenas, pois, doutro modo, há muito que teriam sido descobertas. Mas sempre que se situem para além do erro de experimentação, devem elas ser confirmadas pela observação. Uma conclusão dessas, nova e desconhecida para a mecânica clássica, foi a do desvio da luz num campo de gravitação.

Muitas vezes damos ênfase de mais à evidência experimental no caso da teoria da relatividade generalizada. Na verdade, a evidência é ainda demasiado restrita, apesar de quase não haver dúvidas de que a teoria da relatividade generalizada está mais de acordo com os factos conhecidos do que a mecânica newtoniana. Mas a força da teoria da relatividade não reside neste facto, mas antes na sua consistência interna, na remoção das dificuldades antigas e na sua maior simplicidade lógica.

Se nos lembrarmos do papel da astronomia e da lei da gravitação de Newton na história da nossa civilização, compreenderemos a importância da revolução de Einstein, a qual, pela primeira vez na história da ciência, reviu o problema da gravitação. Mas talvez ainda mais importante seja a evolução que esta

teoria realizou no nosso pensamento físico e filosófico.

Dissemos que a teoria da gravitação de Einstein é lògicamente mais simples do que a teoria de Newton. Esta afirmação necessita de esclarecimento, pois, em geral, a teoria da relatividade generalizada é considerada muito difícil em comparação com a teoria de Newton. Ainda que consideremos ridícula a afirmação de que apenas doze pessoas podem compreender a teoria da relatividade, não devemos negar que, tècnicamente, a teoria da relatividade generalizada é muito mais difícil de entender do que a mecânica clássica. Sem dúvida, esta afirmação é feita, a maior parte das vezes, por aqueles que não entendem nem uma nem outra. Não é nada fácil deduzir da teoria da gravitação de Newton que a Terra gira em volta do Sol seguindo uma trajectória elíptica. Além do conhecimento da mecânica newtoniana, esta dedução requer algum conhecimento de cálculo diferencial e integral. A mesma dedução é ainda mais difícil a partir da teoria da relatividade generalizada. Exige ela o conhecimento e a compreensão da estrutura matemática da teoria da relatividade e esta, por sua vez, o conhecimento da geometria riemanniana e do cálculo tensorial, os ramos da matemática que surgiram sob a influência da teoria da relatividade. A dedução em si é mais longa, mais monótona, e no caso da Terra encontramos intricadas equações de movimento que, na primeira aproximação, não dão as antigas equações de Newton. Porém, podemos ainda afirmar que a teoria de Einstein é lògicamente mais simples do que a antiga teoria de Newton, isto no caso de fazermos distinção entre simplicidade *lógica* e *técnica*. Pondo de parte suposições artificiais e desnecessárias, alcançamos uma maior simplicidade lógica. Mas então as nossas deduções serão mais longas

e monótonas. Fizemos menos suposições e, por essa razão, devemos deduzir mais. Isto soa como um paradoxo, mas a teoria da relatividade generalizada parece ser difícil precisamente porque é tão simples e pressupõe tão pouco.

Se dois corpos, *A* e *B* — digamos a Terra e o Sol —, se encontram em movimento relativo, não faz sentido admitir, evidentemente, que *A* repousa e *B* se move ou que *A* se move e *B* repousa. Tudo quanto podemos observar é o movimento de um corpo em relação ao outro. Não tem sentido, por exemplo, discutir o movimento de um corpo existente no universo, porque movimento significa mudança da posição relativa. Tudo isto é hoje bom senso comum, e é pena que a mecânica clássica se tivesse desviado deste modo de ver.

A teoria de Ptolemeu, defendida durante muito tempo pela Igreja, afirma que a Terra está parada e o Sol se move. Por outro lado, Copérnico afirmou que a Terra se move e o Sol está parado. Mas, de acordo com o vulgar senso comum, ambas estas afirmações parecem não ter sentido. Ainda que concordemos que o Sol parou em virtude da ordem de Josué, essa ordem implicava, manifestamente, que o Sol parasse em relação à Terra. Essa ordem é inteiramente equivalente à que exigisse à Terra que parasse em relação ao Sol. Pergunto a mim mesmo se um tal argumento convenceria aqueles que queimaram Giordano Bruno e meteram Galileu na prisão. Duvido bastante, porque a defesa de Galileu era quase exactamente esta. Ele afirmava que, por hipótese, imaginava um *sistema* em que o Sol estivesse parado. Mas então podemos ainda duvidar que Galileu estivesse em posição de ser sincero quando enfrentou os príncipes da Igreja.

Para quê, pois, toda esta agitação? A resposta está em que a mecânica clássica se afasta do «ponto de vista normal», pelo qual afirmamos que existe apenas movimento relativo. De acordo com a mecânica clássica, há um *sistema*, ou, antes, um grupo de *sistemas* movendo-se uniformemente, em que são válidas as leis da física. É este *sistema* (ou, melhor, estes *sistemas*) aquele a que devemos referir o movimento e no qual podemos aplicar as leis da mecânica clássica, em toda a sua beleza e simplicidade. Deste modo, de acordo com a mecânica clássica, podemos falar do movimento de um corpo, mesmo que seja o único corpo no universo. Imaginemos um quarto com as janelas fechadas para o mundo exterior. Se uma força nova empurrasse todos os objectos do quarto para fora do centro, podíamos deduzir, de acordo com a mecânica clássica, que o nosso *sistema* tinha cessado de ser inerte, porque o quarto começara a rodar.

É assim que a mecânica clássica arruína o ponto de vista «normal». Podemos descobrir mesmo o movimento de um corpo isolado, isto é, podemos descobrir o movimento *absoluto* se as leis da mecânica, formuladas para um sistema em inércia, não forem válidas no *sistema* ligado a esse corpo.

Este afastamento da mecânica clássica do ponto de vista normal foi criticado por Mach. Embora Mach seja hoje condenado como filósofo idealista, não há dúvida de que a sua análise *física* especial teve um papel no desenvolvimento da física que levou à teoria da relatividade. A teoria da relatividade volta ao ponto de vista normal. Formula um princípio que deveria ser válido, não só para os fenómenos da gravitação, mas também para *todos* os fenómenos naturais. É o princípio da *invariância*.

As leis naturais devem ser válidas em qualquer sistema.

Enquanto na teoria da relatividade restrita tratamos de *sistemas* movendo-se uniformemente em relação uns aos outros, na teoria da relatividade generalizada tratamos de *sistemas* em movimento relativo arbitrário. Não existe movimento absoluto. A afirmação de que a Terra ou o Sol se movem não tem qualquer significado. Temos novas léis que podemos aplicar quer a um *sistema* relacionado com o Sol quer a um *sistema* relacionado com a Terra. Pode ser mais conveniente, para alguns problemas especiais, relacionar o nosso *sistema* com o Sol, mas a diferença é apenas de carácter técnico. Na prática, um *sistema* permite uma melhor descrição da realidade do que o outro. Lògicamente, ambos os *sistemas* são equivalentes e qualquer *sistema* é permitido. Podemos verificar isso se compararmos a teoria de Ptolemeu com a de Copérnico. Mas as leis da teoria da relatividade generalizada *podem* ser usadas em *qualquer sistema.*

Pode parecer que a teoria da relatividade generalizada focou dois problemas diferentes: o da gravitação e o da formulação de leis naturais para um *sistema* qualquer. Mas estes dois problemas são, na verdade, um só. Lembramo-nos do importante exemplo do elevador caindo, em que considerámos dois *sistemas* movendo-se não uniformemente em relação um ao outro. Um era quase inerte e no outro havia um campo de gravitação. É este campo de gravitação que aparece e desaparece em regiões pequenas se passarmos dum *sistema* para outro (se quisermos excluir a gravitação, teremos então de restringir os *sistemas* àqueles que se movem uniformemente). É o campo de gravitação que nos permite formular leis válidas para qualquer *sistema*. Repito: o campo de gravitação pode

ser criado ou anulado em pequenas regiões pelo processo da transformação. Assim, a discussão do elevador caindo dá-nos a indicação certa. O resultado final de uma longa cadeia de raciocínios vindos dessa indicação é:

1. A formulação das leis do campo de gravitação. Como acontece com as equações de Maxwell para o campo electromagnético, as equações do campo de Einstein descrevem mudanças do campo de gravitação no espaço e no tempo. Estas equações, em toda a sua universalidade e beleza, foram formuladas por Einstein. Parecem simples, mas são das mais difíceis equações do ponto de vista de trabalho prático. Mas se o campo de gravitação for pequeno, podemos mostrar com relativa facilidade que essas equações podem ser reduzidas às antigas equações de Newton. Estou tentado a escrever as equações de campo de Einstein para o espaço vazio, e posso fazê-lo num espaço diminuto. Ei-las: $R_{kl} = 0$; mas para saber o que R_{kl} significa e qual a estrutura desta equação é essencial ter o conhecimento técnico necessário. Este pode ser adquirido ao fim, digamos, de dois ou três anos de estudo por quase todos os que gostam de matemática (em geral, aqueles que gostam de matemática têm também capacidade suficiente para a compreender). Logo que se compreendam essas equações, sabe-se a parte mais essencial da teoria da relatividade generalizada.

2. A teoria da relatividade generalizada torna possível formular leis naturais para um *sistema* arbitrário. Deste modo, desaparece da física o fantasma perturbador do *sistema* de inércia e podemos escolher o *sistema* que quisermos. As nossas leis são válidas em qualquer deles. Numa linguagem mais técnica dizemos: as leis da física são *invariantes* no que diz respeito a uma transformação arbitrária.

Verificamos que profunda transformação a teoria da relatividade operou nos nossos princípios físicos. Na verdade, é uma revolução só comparável à realizada por Newton ou Maxwell. Também esclarece a relação entre a física e a geometria, alterando as nossas opiniões acerca deste antigo problema filosófico.

O físico clássico pressupunha que o nosso espaço tridimensional era euclidiano e que o tempo era absoluto. Na teoria da relatividade restrita consideramos espaço e tempo como um princípio quadridimensional dos acontecimentos. De acordo com a teoria da relatividade generalizada, este princípio é não-euclidiano. Para resolver o problema da gravitação de acordo com os nossos princípios de campo e introduzir leis válidas em qualquer *sistema* somos obrigados a considerar a geometria do tempo-espaço duma maneira diferente. É aqui que entra a relação entre a geometria e a física.

Foi esta parte da estrutura, a parte matemática, que requereu mais tempo e trabalho na obra de Einstein. Este nunca se considerou um matemático, mas sim, e justamente, um filósofo, porque os problemas físicos que tratou estão estreitamente relacionados com problemas filosóficos que têm preocupado os pensadores durante toda a história da nossa civilização. Estes problemas, porém, tais como os de tempo, espaço, geometria, foram transferidos por Einstein do campo da especulação para o campo da física, para o campo da ciência, de raciocínio rigoroso, que tem a matemática como instrumento. Einstein aprendeu matemática quando necessitou dela e para o fim para que dela precisava. Aprendeu? Seria melhor dizer que a reinventou, pois sempre preferiu pensar por si mesmo a ler livros. No caso da teoria da relatividade generalizada, a parte matemática de que

a princípio necessitou era ainda rudimentar. Mais tarde desenvolveu-se ràpidamente por causa das necessidades crescentes da teoria da relatividade generalizada.

Quando eu estava em Berlim, Einstein fez uma conferência na Academia Prussiana da Ciência acerca da relação entre geometria e experiência. Mais tarde repetiu a conferência para os estudantes universitários. Eu era um dos ouvintes. Ninguém que tivesse estudado a teoria da relatividade poderia deixar de ficar impressionado com a profundidade e a simplicidade das ideias filosóficas de Einstein e com o encanto da forma como as explicava. Houve um período para discussão, e muitos filósofos com estranhas ideias na cabeça fizeram perguntas confusas: «E Kant?». «O que está dizendo, senhor professor, contradiz Kant». De facto! Como é possível contradizer Kant, e precisamente em Berlim?! Einstein, como sempre, gozava o espectáculo. Nem se zangava nem se impacientava ao ouvir as palavras *transcendente, a priori, Weltanschauung* e todo o lixo que a teoria da relatividade varrera e que ainda hoje enche muitos livros e muitos institutos de filosofia especulativa. As palavras ocas têm uma vida resistente!

Qual é afinal a relação entre a geometria e a física? Para uma melhor compreensão, simplifiquemos o nosso problema.

Imaginemos duas criaturas racionais vivendo num espaço bidimensional. Podemos observar as suas acções e até ficar comovidos com elas, como qualquer pessoa que chore durante um filme. Mas não tomemos demasiado a sério esta comparação com um filme. Figuremo-nos uma tela infinitamente grande, esqueçamos a perspectiva e imaginemos criaturas planas com um único perfil, como as duma pintura egípcia. Suponhamos igualmente que essas criaturas têm cére-

bro e agem voluntàriamente. Para elas o espaço bidimensional será aquilo que o espaço tridimensional é para nós. Se forem inteligentes, poderão, com o tempo, desenvolver o conhecimento da geometria plana de Euclides, ou seja, da mesma geometria que aprendemos nos nossos dias de liceu. Se iniciarem uma viagem em linha recta, nunca voltarão ao ponto de partida; duas linhas paralelas nunca se encontrarão e o perímetro de um círculo será 2π vezes o raio desse círculo. Esses seres, podemos imaginá-lo, podem ter mesmo um tipo primitivo de física. Talvez tenham realizado experiências com raios luminosos; talvez tenham adquirido as noções de tempo e de velocidade; talvez tenham descoberto que a velocidade da luz é, como no nosso espaço tridimensional, de 300 000 km por segundo.

Tendo iniciado a nossa história das criaturas bidimensionais, passemos ao seu segundo capítulo. Imaginemos que, num dado momento, alguém transportou estas criaturas, enquanto dormiam, para a superfície de uma esfera, uma esfera muito grande. Para quê uma esfera muito grande? Apenas para que essas criaturas, ao acordarem, não notem qualquer diferença. O seu sistema de comunicações não está suficientemente desenvolvido para descobrirem que, iniciada uma viagem «em frente», regressarão ao ponto de partida. Se desenharem um pequeno círculo, não descobrirão que o seu perímetro é um pouco menor do que 2π vezes o raio do círculo. Mas com o decorrer do tempo, quando novas gerações aparecerem e morrerem e a sua ciência e a sua técnica se tiverem aperfeiçoado cada vez mais, descobrirão que algo está errado na geometria euclidiana, que receberam dos seus antepassados. Concluirão, por fim, que é mais conveniente e mais conforme com as suas observações usar, não a geometria euclidiana de um plano,

mas a geometria não-euclidiana de uma esfera. Durante algum tempo os elementos mais conservadores da comunidade resistirão contra tal inovação e talvez queimem, num fogo bidimensional, as criaturas que proclamam a geometria não-euclidiana. Estas criaturas conservadoras talvez digam que os padrões usados não eram perfeitamente rígidos e que havia algumas diferenças de temperatura que explicariam a aparente contradição da geometria euclidiana. Mas finalmente a ciência, como sempre, vencerá nessa luta. Os habitantes bidimensionais da esfera reconhecerão lentamente que a geometria não-euclidiana é muito mais conveniente. Aprenderão, assim, que uma «linha recta» (para nós um círculo na esfera) é sempre fechada e que um raio luminoso emitido de qualquer ponto *P* voltará ao ponto de partida. Anunciarão os últimos resultados mesmo que não possam viajar em volta de toda a esfera e mesmo que uma centena de gerações devam nascer e morrer antes de descobrirem, numa experiência actual, que um raio luminoso regressa de facto ao ponto de partida. Deduzirão estes resultados porque agora, na sua vizinhança, a geometria de tipo não-euclidiano descreve melhor e mais econòmicamente os fenómenos do que a antiga geometria euclidiana. No meio destas criaturas bidimensionais ter-se-á dado então uma revolução científica.

Esta história não é tão fantástica como parece. Na verdade, algumas das suas características fazem-nos lembrar a história da Terra e a maneira como foi conhecida a sua forma esférica.

Voltemos às criaturas bidimensionais para contar a terceira e última parte da história. Imaginemos que se deu uma nova mudança. De novo algo aconteceu repentinamente a estas criaturas enquanto dormiam. Desta vez não se deu no campo da geometria, mas no da física (se faz qualquer sentido estabelecer

uma diferença nítida entre geometria e física). Podemos imaginar as criaturas vivendo na esfera; escolhamos dois pontos opostos, a que podemos chamar pólo norte e pólo sul. A temperatura da esfera, que até agora tem sido, digamos, uniforme, sofre uma mudança brusca. Nos pólos é fria, e quanto mais se afasta deles mais quente é, sendo o equador a linha de maior calor. Nos pólos faz tanto frio que a temperatura ali é de zero absoluto. Isto significa que a dimensão de todos os seres vivos, de todas as varas rígidas, tendem para zero ao aproximarem-se dos pólos. Assim, as criaturas, ao encaminharem-se para os pólos, tornam-se cada vez menores, assim como diminuem as suas dimensões, os seus passos, e, nesse caso, nunca alcançarão os pólos. Viajando segundo os círculos de latitude, verificarão, se as temperaturas forem convenientemente ajustadas, que cada um desses círculos é tão longo como o equador, porque os seus padrões de medição e as suas dimensões diminuem proporcionalmente; os círculos são menores, mas os padrões são-no também.

Deste modo, acham-se as nossas criaturas bidimensionais perante uma situação inteiramente nova e têm duas possibilidades de ajustar a sua ciência ao seu mundo diferente. Se os seus corpos bidimensionais não forem sensíveis à mudança de temperatura, poderão então admitir que vivem agora, não numa superfície plana, não numa esfera, mas num cilindro infinito. É infinito para eles, pois nunca lhe atingem o fim, quer se dirijam para norte quer para sul. Mas será finito se seguirem pelos círculos paralelos, tendo todos estes círculos o mesmo raio, pois que as criaturas nada sabem a respeito da mudança de escala que verificámos existir quando olhámos para a sua esfera com as nossas vantagens de seres tridimensionais.

Mas se, por outro lado, forem sensíveis ao calor e ao frio, talvez prefiram continuar a viver numa esfera e saber que nessa esfera há agora dois pontos determinados que nunca poderão alcançar porque a temperatura ali é de zero absoluto.

Ninguém sabe qual será a escolha dessas criaturas. Depende de muitas circunstâncias que não desejamos analisar aqui. Talvez até tenham duas teorias opostas.

A nossa história tem um significado profundo. Demonstra quão estreitamente relacionadas estão física e geometria. Lembremo-nos de que as criaturas bidimensionais têm a possibilidade de escolher entre admitir, por um lado, as diferenças de temperatura e a geometria esférica, ou, por outro lado, a igualdade de temperaturas e a geometria cilíndrica (que é essencialmente uma geometria euclidiana).

Nós, como seres tridimensionais, estamos numa situação semelhante. Temos de tratar a geometria e a física como *um único* sistema de conhecimento. A nossa tarefa científica é a formulação desse sistema único, mais consistente e mais conveniente para a descrição dos fenómenos naturais. O sistema é bom se funcionar.

Eis o que a teoria da relatividade nos ensinou: se desejarmos abandonar conceitos vazios de um *sistema* de inércia, se desejarmos formular leis de campo para a gravitação ou leis invariantes que sejam válidas em qualquer sistema, se desejarmos fazer tudo isto, devemos então conceber uma geometria não-euclidiana do nosso tempo-espaço quadridimensional. É o campo de gravitação que caracteriza a geometria do nosso mundo. Uma superfície plana de borracha pode ser deformada pela acção de forças exteriores. Do mesmo modo, massas em movimento deformam o nosso espaço-tempo. Essas massas determinam se, e

até que ponto, o nosso espaço-tempo é não-euclidiano. As duas perguntas «Qual é a geometria do nosso mundo?» e «Qual é o campo de gravitação do nosso mundo?» são idênticas. Geometria e gravitação são sinónimas. São determinadas pela distribuição das massas e das suas velocidades. Citei atrás as equações da teoria da relatividade generalizada para o espaço vazio. São essas as equações que descrevem, não só a geometria, como o campo de gravitação do mundo em regiões nas quais não existe matéria.

Sei muito bem que estas ideias são difíceis. Sob vários aspectos, é mais fácil compreender a teoria da relatividade com o auxílio da matemática do que sem ele. No entanto, espero ter mostrado quão básicos são os novos princípios, quão profundas são as consequências filosóficas da relatividade e quão radicalmente esta teoria transforma a ciência do nosso mundo.

Entre as conclusões que se podem tirar da teoria da relatividade generalizada que estão em oposição com as da mecânica clássica há uma muito conhecida: o movimento peri-hélio do planeta Mercúrio. Em 1916 constituiu a primeira confirmação da teoria da relatividade. Esta conclusão foi, naquela altura, rigorosamente deduzida das equações de Einstein pelo famoso astrónomo Schwarzschild. No entanto, sob vários aspectos, esta afirmação é uma simplificação exagerada. A história completa deste problema é mais complicada. Vou referir o assunto em poucas palavras.

A estrutura da teoria da relatividade generalizada progrediu duma forma relativamente lenta, formulada e tornada a formular por Einstein nos trabalhos publicados nas «notícias» da Academia

Prussiana. Einstein teve, por vezes, de trilhar de novo o caminho que antes percorrera e de corrigir erros ao penetrar cada vez mais profundamente no problema da gravitação. Cerca de 1916 estava completamente formulada a estrutura da teoria da relatividade generalizada, tendo sido de novo resumida num longo trabalho que apareceu em *Annalen der Physik* com o título «Os fundamentos da teoria da relatividade generalizada». Nenhumas alterações fundamentais foram feitas depois, ainda que muitos resultados tenham sido acrescentados e desenvolvidos.

A teoria da relatividade generalizada, tal como foi formulada em 1916, assentava em dois pilares. Um deles representava as equações do *campo*, isto é, as equações que descrevem a variação no espaço e no tempo do campo de gravitação, ou, se preferirmos, do campo geométrico. O outro representava as equações de movimento, dizendo-nos como se move um corpo nesse campo de gravitação. Estas equações substituíram as antigas equações de Newton, em que a força da gravitação é proporcional à aceleração. Mas agora, na teoria da relatividade generalizada, as equações do movimento, como todas as leis naturais, são válidas, não só num *sistema* de inércia, como também num *sistema* arbitrário.

Se quisermos determinar, por exemplo, o movimento de um planeta no campo de gravitação do Sol, teremos primeiro de achar o campo de gravitação do Sol a partir das equações do campo da teoria da relatividade generalizada. Em seguida temos que aplicar as equações do movimento no campo conhecido e determinar o movimento do planeta. Foi precisamente isto que Schwarzschild fez com grande perícia matemática. O seu resultado, porém, só é válido se o planeta for pequeno em comparação com o Sol. Os astrónomos conhecem a existência de muitas estrelas duplas: dois

corpos movendo-se em volta um do outro como se fossem dois sóis. Não podemos supor que uma é pequena em relação à outra. Não podemos tratar deste movimento das estrelas duplas pelo método de Schwarzschild. Sabemos apenas, em relação à equação de movimento na teoria da relatividade generalizada, que esta equação só pode ser aplicada a um corpo pequeno (um planeta) num campo que não seja demasiadamente perturbado pela presença desse corpo pequeno.

Temos equações do campo e equações de movimento; mas as equações de movimento, tal como são conhecidas, explìcitamente, na teoria da relatividade generalizada, têm apenas uma validade restrita. Até 1938 desconhecíamos uma solução para o problema do movimento das estrelas duplas na teoria da relatividade generalizada, embora soubéssemos a solução deste problema segundo a mecânica clássica. Não deve haver problema tão difícil como o de um sol pesado e um planeta pequeno.

Desde há muito que Einstein acreditava que as equações de movimento eram desnecessárias na teoria da relatividade generalizada, que tais equações não precisam de ser admitidas, que elas podem ser *deduzidas* das equações do campo, que podemos desistir das equações de movimento e esquecê-las, que o *único* pilar sobre o qual a relatividade geral está assente é formado apenas pelas equações do campo.

Demonstrou-se que tudo isto era verdadeiro, mas levou-se muito tempo para o provar. Todos os meios técnicos para isso estavam já em 1916 na posse dos matemáticos e dos físicos. Eles conheciam as equações do campo. Tudo quanto era necessário era mostrar que estas continham as equações de movimento.

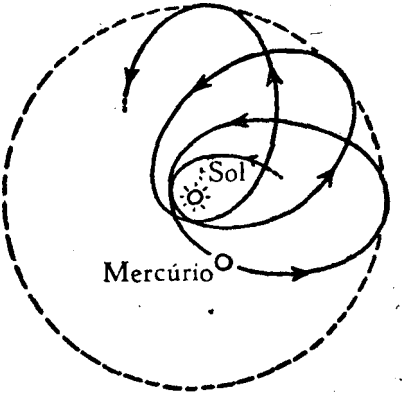
Era o mesmo que desenterrar um tesouro profundamente enterrado e cujo esconderijo é conhecido. Einstein atacou repetidas vezes este problema, abandonando-o para tratar de muitos outros, mas regressando novamente a ele. Também outros cientistas pensaram sobre o assunto. Entretanto Hitler subiu ao poder. Einstein abandonou a Alemanha e estabeleceu-se no Institute for Advanced Study, em Princeton, nos Estados Unidos. Embora o trabalho sobre os problemas do movimento tivessem sido iniciados há cerca de vinte anos (1929), só recentemente (1949) foi apresentada uma teoria lògicamente satisfatória. Colaborei com Einstein neste problema há cerca de doze anos (1937) e mais uma vez em 1949.

Desta história podem tirar-se dois ensinamentos. O primeiro mostra quão difíceis são as deduções matemáticas, quão complicadas são as equações da teoria da relatividade generalizada e quão profundamente podem estar escondidos os seus segredos. O segundo tem um certo significado filosófico e está ìntimamente relacionado com a ideia que acabámos de exprimir. É lògicamente mais simples admitir apenas equações do campo e dispensar as equações de movimento; temos, porém, que pagar pela simplicidade lógica o alto preço das maiores dificuldades técnicas.

Voltemos agora à aplicação das equações de movimento deduzidas das equações do campo, ou expressas explìcitamente, ao movimento de um pequeno planeta.

Esperamos, evidentemente, em primeira aproximação, movimento newtoniano, porque a teoria de Newton resulta da teoria da relatividade generalizada. Mas, se penetrarmos mais fundo, acharemos diferenças entre a teoria de Newton e a da relatividade

generalizada; estas diferenças podem ser confirmadas pela observação.



A elipse descrita por Mercúrio roda muito lentamente relativamente ao *sistema* relacionado com o Sol

Podemos esperar desvios em relação às leis de Newton apenas para campos de gravitação fortes. Os planetas, entre os quais a Terra, giram em volta do Sol, formando uma elipse. Mercúrio é o planeta mais próximo do Sol, e a atracção entre os dois (para usar a linguagem clássica) é, pois, mais forte do que a atracção entre o Sol e qualquer dos outros planetas. Se tivermos a esperança de encontrar um desvio em relação à lei de Newton, a nossa maior probabilidade é de encontrá-lo no caso de Mercúrio. Resulta da teoria de Newton que o planeta Mercúrio, como todos os outros planetas, se move ao longo de uma elipse, mas esta elipse é a menor, comparada com a trajectória dos outros planetas do nosso sistema

solar. Mas, de acordo com a teoria da relatividade generalizada, o movimento deve ser um pouco diferente. Não só Mercúrio deveria girar em torno do Sol, como a elipse que descreve deveria também rodar muito lentamente em relação ao sistema relacionado com o Sol. É esta rotação da elipse que exprime o novo efeito da teoria da relatividade generalizada e o seu afastamento da teoria de Newton. A teoria da relatividade prevê também a grandeza deste efeito: a elipse do planeta Mercúrio deveria fazer uma rotação completa em três milhões de anos. Vemos quão pequeno é este efeito e quão mais difícil seria achar um efeito semelhante, mas mais pequeno ainda, para outros planetas.

O desvio da trajectória do planeta Mercúrio em relação a uma elipse era já conhecido antes da formulação da teoria da relatividade generalizada, mas desconhecia-se quálquer explicação para isso. Por outro lado, Einstein desenvolveu os princípios da teoria da relatividade generalizada sem prestar atenção a este problema especial. O seu único alvo era a remoção das dificuldades e inconsistências lógicas da velha teoria. No caso do planeta Mercúrio a teoria da relatividade generalizada explica com êxito, não só qualitativa como quantitativamente, o afastamento do seu movimento das leis de Newton.

Além destes dois efeitos que mencionámos — o desvio dos raios luminosos e o movimento do planeta Mercúrio —, há um outro, chamado desvio para o vermelho das linhas do espectro vindas do Sol ou das estrelas com um campo forte de gravitação. Este efeito, ainda que deduzido matemàticamente com facilidade, é mais difícil de explicar do que os outros. Desistamos de dar uma exposição mais detalhada e mencionemos apenas ao de leve que também neste caso a sentença dada pela experiência, ainda que

não muito clara e decisiva, parece ser favorável à teoria da relatividade generalizada. Acima de tudo, lembremo-nos de que a força desta teoria não reside em semelhantes confirmações. Ainda que não houvesse qualquer diferença sensível entre a física clássica e a teoria da relatividade generalizada, escolheríamos sem reservas a teoria da relatividade. Negar isto quereria dizer que não compreendíamos a importância da revolução einsteiniana e o enorme esclarecimento que trouxe à física.

O universo

As especulações acerca do universo em que o homem vive são tão antigas como o pensamento e a arte humana, tão antigas como a visão das estrelas luminosas numa noite clara. No entanto, foi a teoria da relatividade generalizada que, há pouco mais de trinta anos, transferiu os problemas cosmológicos da poesia ou da filosofia especulativa para a física. Podemos até determinar o ano em que a cosmologia moderna nasceu: foi em 1917, ano em que o artigo de Einstein intitulado «Considerações Cosmológicas na Teoria da Relatividade Generalizada» apareceu em *Berichten der Preussischen Akademie.*

Embora seja difícil exagerar a importância deste trabalho, e ainda que tenha ocasionado um dilúvio de outros trabalhos e especulações, as ideias originais de Einstein, encaradas do ponto de vista actual, estão antiquadas, talvez mesmo erradas. Creio que Einstein seria a primeira pessoa a admiti-lo.

No entanto, o aparecimento deste trabalho é da maior importância na história da física teórica. É mais um exemplo que mostra como a solução errada de um problema fundamental pode ser incomparà-

velmente mais importante do que a solução certa de um problema trivial e sem interesse.

Porque é que o trabalho de Einstein é tão importante? Porque levanta um problema inteiramente novo: o da estrutura do nosso universo. E também porque mostra que a teoria da relatividade generalizada pode iluminar este problema de maneira inteiramente nova.

O físico clássico pensava que o nosso espaço era tridimensional e que o nosso tempo era comum a todos os observadores — quer estivessem em movimento relativo, quer não. Estes princípios mudaram em 1905, quando Einstein formulou a teoria da relatividade restrita. O físico verificou que para uma melhor formulação dos fenómenos físicos é muito mais conveniente e simples considerá-los numa base de espaço-tempo quadridimensional. Mais tarde, em 1916, descobre que para compreender o fenómeno da gravitação tem, mais uma vez, de generalizar os seus conceitos. Na teoria da relatividade generalizada o universo é representado por uma base não-euclidiana quadridimensional, com a sua métrica determinada por massas e respectivos movimentos.

Novas ideias nascem, na física teórica, do génio e da imaginação de homens que olham para um problema antigo de um ponto de vista inteiramente novo e inesperado. Foi desta forma que nasceram as teorias da relatividade restrita e generalizada; foi assim que a teoria quântica entrou na física. Num artigo de Einstein sobre cosmologia vemos precisamente essa capacidade de considerar antigos problemas duma forma nova. No entanto, sabemo-lo hoje, existe uma diferença fundamental. Enquanto as teorias da relatividade estão hoje quase tão frescas e completas como no dia em que foram criadas e nos últimos trinta anos nada de importância fundamental foi acrescentado à

estrutura apresentada por Einstein, o problema cosmológico apresenta-se hoje duma forma completamente diferente da que tinha no tempo em que Einstein escreveu o seu famoso artigo.

O trabalho sobre cosmologia — o estudo da estrutura do nosso universo — apresenta-se, mais do que qualquer outro trabalho sobre relatividade, como um empreendimento de cooperação. Além do nome de Einstein, há outros igualmente significativos de várias nacionalidades. Citaremos o astrónomo holandês Sitter, o russo Friedmann, o belga Lemaitre, o americano Robertson. Haveria que citar muitos outros: a ciência não conhece fronteiras raciais ou nacionais e os cientistas de todos os países colaboram com êxito quando lhes é permitido fazê-lo.

As ideias primitivas de Einstein foram a origem da ciência da estrutura do universo. Nas mãos de outros investigadores, estas ideias foram mais tarde modificadas e desenvolvidas pela acção de novas observações e novas especulações baseadas na teoria da relatividade generalizada.

Qual é, hoje em dia, a situação geral?

Podemos resumir os resultados de três décadas de investigações experimentais e teóricas com as seguintes palavras: *o nosso universo é um universo de ilhas.* Consta de ilhas materiais, ou galáxias, num mar de vácuo.

Imaginemos que viajamos através do espaço com a maior velocidade *conhecida* e *possível:* a velocidade da luz. Em poucos minutos deixamos o Sol para trás. Em algumas horas deixamos todo o sistema solar. Em poucos anos alcançamos as estrelas mais próximas. Medimos as distâncias celestiais por anos-luz, ou seja, os anos necessários para atravessar essas distâncias viajando com a velocidade da luz.

O nosso sistema solar e todas as estrelas que vemos numa noite clara na *nossa* vizinhança são uma parte da *nossa via láctea,* da *nossa* galáxia; são uma parte apenas da ilha em que vivemos. Mas esta via láctea (a que pertencem o Sol, os planetas e as estrelas visíveis a olho nu) é apenas uma das muitas ilhas, uma das muitas galáxias do nosso universo. Tal como acontece com ilhas longínquas no mar, assim as nebulosas — grandes conjuntos de estrelas — são ilhas de matéria e o mar o espaço vazio. A nossa galáxia é apenas uma dessas ilhas.

Depois de viajarmos durante milhares de anos à velocidade da luz encontrar-nos-emos fora da nossa galáxia; então, para alcançarmos a próxima ilha, o aglomerado seguinte de estrelas, quase temos de viajar mais 1 000 000 de anos! Este cálculo não tem nada de fantástico; não há também qualquer razão para se ficar perturbado com a extensão do vácuo e a escassez de matéria no nosso universo. Há até menos razão para se ficar preocupado a esse respeito do que com a raridade de estações de serviço numa estrada deserta, porque nunca viajaremos nessas estradas do universo. Os raios luminosos que chegam até aos nossos olhos, vindos de nebulosas longínquas, são os únicos mensageiros que aí viajam; esses raios não se importam com o vácuo existente; pelo contrário, não poderiam alcançar a Terra se encontrassem demasiada matéria absorvente na sua longa viagem.

Examinemos a evidência fornecida por estes mensageiros luminosos e recolhida pelos nossos poderosos telescópios.

Centenas de milhares dessas ilhas nebulosas têm sido fotografadas. A mais afastada de nós e ainda visível, embora muito fracamente, está a meio bilião de anos-luz. É o máximo que hoje podemos alcançar. Com a construção de melhores telescópios (como o

que foi há pouco construído com um reflector de cerca de 2,5 m de diâmetro) poder-se-á penetrar ainda mais longe.

A nebulosa normal tem um diâmetro aproximado de 20 000 anos-luz. A distância normal entre as nebulosas é de 2 000 000 de anos-luz. Repito: as nebulosas são ilhas num mar de vácuo.

O grande astrónomo E. Hubble faz pitorescamente a seguinte comparação: imaginemos algumas bolas de ténis espalhadas, a uma distância de 15 m umas das outras, numa esfera de 8 km de diâmetro. Nesta comparação cada bola de ténis representa uma nebulosa composta de muitos milhões de estrelas. Os 8 km de diâmetro representam a distância que hoje podemos alcançar. Os 15 m que separam as bolas umas das outras mostram quão pouca matéria e quanto espaço vazio existem no nosso universo.

Eis, no seu conjunto, a estrutura do nosso universo, tal como nos é revelado pela observação e pela interpretação teórica dos resultados da observação.

Estamos interessados na estrutura do nosso universo *no seu conjunto*, isto é, nas suas características gerais, em médias, enquanto ignoramos pequenas irregularidades e desvios cosmològicamente sem importância. Do mesmo modo, ao planearmos uma viagem de avião à volta da Terra, estamos mais interessados na distribuição dos aeroportos do que nas aldeias que existem entre esses aeroportos. Para esse fim, consideramos a Terra como uma esfera, com pontos representando os campos de aviação. Mas noutras alturas, ao cuidarmos dos problemas diários, devemo-nos preocupar — e preocupamo-nos de facto — com os nossos vizinhos e com os assuntos da nossa vida caseira.

Ao considerarmos o universo no seu conjunto, estamos pouco interessados nas pequenas irregulari-

dades, no facto de cada nebulosa ter a sua forma e tamanho particulares, uma idade e história próprias. Considerá-las-emos todas iguais e esqueceremos as diferenças existentes nos seus tamanhos e nas distâncias que as separam. A nossa imagem de nebulosas *equidistantes* de *tamanhos iguais* é uma imagem simplificada. Como sempre em ciência, também aqui simplificamos e idealizamos; com o decorrer do tempo, pela influência de novas observações, complicamos, em geral, a nossa simples representação inicial. Mais tarde ainda, estas complicações crescentes tornam o quadro tão disforme na sua complexidade que ele tem de ser regeitado, procurando-se então uma nova imagem. Mas em cosmologia, ciência recente, ainda não fomos além dos primeiros passos. A nossa representação é ainda muito simples — talvez simples de mais!

Chegamos agora à particularidade mais característica e mais enigmática do nosso universo. Foi-nos ela revelada também através da observação. Expressarei o resultado em linguagem técnica primeiramente: *os espectros das nebulosas mostram um desvio em relação ao vermelho;* ou, em linguagem menos científica: *as nebulosas parecem fugir de nós.*

Uma explicação destas duas afirmações equivalentes só pode ser dada com termos de física.

O som do apito de uma locomotiva que se aproxima da estação de caminho de ferro parece ser, para um observador na estação, mais agudo do que o som do mesmo apito quando a locomotiva se encontra parada. Do mesmo modo, o som do apito parece menos agudo quando a locomotiva parte da estação. Este efeito acústico, muito conhecido, é chamado *efeito Doppler.*

Encontramos também um fenómeno semelhante na vida comum. Imaginemos uma excursão que parte

num automóvel e que nos manda, de hora a hora, um mensageiro numa motocicleta. Receberemos sempre, todas as horas, um mensageiro, ainda que a excursão se encontre parada num hotel. Mas se o carro se afastar de nós, começaremos a receber os mensageiros com intervalos superiores a uma hora; se o automóvel se aproxima de nós, receberemos os mensageiros com intervalos inferiores a uma hora. Na verdade, podemos saber a velocidade com que a excursão anda, no nosso sentido ou no oposto, pela frequência com que os mensageiros chegam, se soubermos a velocidade dos mensageiros e a frequência com que são enviados. O mesmo acontece com o apito da locomotiva. A intensidade do som mede a frequência com que os mensageiros sonoros nos chegam, e é maior (isto é, a frequência é maior) quando a locomotiva avança no sentido da estação e menor quando se afasta.

Um efeito muito semelhante, também muito conhecido na física, é o efeito Doppler em *óptica*.

Um espectroscópio é um instrumento para a análise da luz. Por exemplo, se a origem da luz é um gás através do qual passa uma corrente eléctrica (como acontece com o tubo de néon), nesse caso o que vemos, ao olharmos para a origem através de um espectroscópio, são riscas estreitas e brilhantes num fundo escuro. Os vapores de elementos diferentes dão sistemas diferentes de riscas. Não há dois elementos diversos com dois sistemas lineares idênticos, como não há dois homens com impressões digitais semelhantes. Deste modo, o sistema linear caracteriza ùnicamente o elemento a que pertence, e qualquer elemento é caracterizado pelo seu sistema linear.

Pela análise da luz das estrelas ou de nebulosas podemos descobrir a presença dos mesmos elementos que conhecemos e analisámos na Terra. Os espectros

do hidrogénio ou do hélio têm a mesma estrutura, venham eles da Terra, do Sol, das estrelas da nossa galáxia ou de nebulosas.

E não só vemos a mesma estrutura (de outro modo não poderíamos dizer se é o mesmo elemento), mas também reconhecemos diferenças se compararmos o espectro de um elemento da Terra com o espectro do mesmo elemento numa nebulosa. Todo o espectro (ou seja, *todas* as riscas que caracterizam o elemento) se desloca ligeiramente. Isto é igualmente o que acontece, como sabemos, não só pela teoria como pela experiência, se a origem da luz (tubo de néon, estrela, nebulosa) se afasta ou se aproxima de nós. É o mesmo efeito, o efeito Doppler, que verificámos há pouco no exemplo dos mensageiros e no do apito da locomotiva: o sistema de riscas desvia-se em direcção ao *extremo vermelho* do espectro se a origem da luz se afasta do observador; as linhas deslocam-se em direcção ao *extremo violeta* do espectro se a origem da luz se aproxima do observador. O desvio na direcção do extremo vermelho indica uma frequência reduzida dos mensageiros luminosos e uma dilatação na direcção do extremo violeta indica uma maior frequência dos mensageiros luminosos. Como aconteceu com os mensageiros e com o apito, podemos agora calcular, por intermédio desses desvios para o vermelho ou para o violeta, a velocidade com que a origem luminosa se aproxima ou afasta de nós.

Surge uma questão: porque agem as nebulosas assim, como que afastando-se da nossa galáxia? A resposta mais simples seria: as nebulosas agem como que afastando-se da nossa galáxia porque na verdade se afastam. Mas a questão mantém-se: porque se afastam elas?

Se o desvio para o vermelho e a fuga das nebulosas tivessem sido descobertos nos tempos bíblicos,

talvez hoje tivéssemos uma resposta satisfatória (não ignoro a tolice desta minha afirmação!). Poderíamos supor o seguinte: em cada galáxia existem alguns sistemas planetários e a Terra não é o único planeta habitado por criaturas ditas inteligentes. Visto que o nosso planeta é o único em que Adão pecou e o único em que os homens se matam uns aos outros, todas as outras nebulosas têm um complexo, profundamente arraigado, contra a nossa galáxia, e por isso se afastam de nós o mais que podem.

Evidentemente, esta hipótese não é satisfatória; mesmo que os habitantes dos outros planetas pudessem ver o que se passa na Terra, veriam *agora* o que aconteceu há milhões de anos, porque a luz levaria milhões de anos a lá chegar. Em segundo lugar, há um ponto curioso, mesmo muito curioso. O desvio para o vermelho *aumenta* com a distância. Isto significa que a velocidade da nebulosa em fuga parece maior quanto mais afastada a nebulosa estiver da nossa galáxia. Isto é espantoso! Porque aumentaria a aversão com a distância? A lei do aumento do desvio para o vermelho é em si extremamente simples: quanto maior fôr a distância maior será, proporcionalmente, o desvio. Uma nebulosa que esteja afastada 100 milhões de anos-luz parece afastar-se de nós dez vezes mais depressa do que uma nebulosa distante apenas 10 milhões de anos-luz. Esta lei, relacionando o desvio com a distância, parece ser relativamente exacta, embora pareça existirem alguns pequenos erros sistemáticos. No entanto, a lei é boa, permitindo-nos até determinar as distâncias de nebulosas muito afastadas, usando a lei do desvio para o vermelho.

Voltemos à nossa questão. Qual é a explicação da lei do desvio para o vermelho?

Em busca de uma solução, deixemos o domínio das observações e entremos no campo da especulação, no

da teoria da relatividade generalizada. Há uma ponte que leva a este campo da especulação, isto é, existe um princípio importante que pertence, em parte, ao campo da observação e, em parte, ao domínio da especulação.

Se olharmos em vários sentidos através dos nossos telescópios, veremos que, estatìsticamente, não existe distinção entre estes sentidos. Encontramos, em geral, tantas nebulosas num sentido como noutro. Vemos também que o número de nebulosas por unidade de volume se mantém constante em qualquer profundidade que o telescópio alcance. O nosso universo parece estar uniformemente preenchido com matéria.

Evidentemente, existem algumas irregularidades, mas são pequenas, e por isso nos é permitido admitir, com uma boa aproximação, que não há sentidos distintos e que nenhum ponto no espaço se distingue dos outros.

Podemos concluir, deste modo, que o nosso universo é *uniforme*. Talvez tivéssemos chegado depressa de mais a esta conclusão. Parece que tudo quanto conhecemos é um simples fragmento do nosso universo, e um telescópio maior talvez revele algumas irregularidades, alguns desvios sistemáticos da uniformidade. Isto é muito possível. Se aceitarmos, porém, que o nosso universo não é uniforme, teremos de saber de que modo muda em direcção e profundidade. Obviamente, dizer que o nosso universo é uniforme significa fazer a afirmação mais simples possível. Assim, supomos (e isto é uma hipótese fundamental) a uniformidade do nosso universo, e com isso não contradizemos a experiência.

Esta suposição, tirada essencialmente da observação, foi recebida pela teoria e muito modificada. Tornou-se, por assim dizer, um mandamento moral para o nosso universo. Afirmamos: a história do nosso universo

deve, quando tomada no seu conjunto, ser a mesma, quer seja escrita da nossa galáxia, quer de qualquer outra nebulosa. Imaginemos (visto a nossa imaginação não ter limites) que enviamos a cada nebulosa um observador, cada um deles devidamente equipado com inteligência e instrumentos. A imagem do nosso universo deve ser a mesma para todos os observadores. É isto que queremos significar com o princípio da uniformidade. Haverá, evidentemente, pequenas anomalias na descrição de todos esses cientistas, que povoam globos diferentes em diversas nebulosas, mas nelas reflectir-se-á igualmente a imagem dum universo bem homogéneo e idealizado.

Temos agora um princípio poderoso a limitar as possibilidades da estrutura do nosso universo. A representação do nosso universo tem de se coadunar com o princípio da uniformidade.

Voltemos à questão anterior. Como explicar o desvio para o vermelho? A nossa questão torna-se agora mais geral e mais difícil. Se aceitarmos o princípio da uniformidade, isso significa que o observador numa nebulosa fora da nossa galáxia também nota o desvio para o vermelho. As nebulosas afastam-se não só de nós, mas também umas das outras.

Mas até esta conclusão é prematura. Talvez que o desvio para o vermelho possa ser explicado também doutra maneira, e não apenas supondo que as nebulosas fogem umas das outras. Tudo quanto agora podemos supor é que cada observador, em cada uma das nebulosas, confirmaria a existência do desvio para o vermelho e que cada observador descobriria que esse desvio é proporcional à distância.

Somos, deste modo, levados a uma outra questão: que possíveis estruturas do nosso universo são coerentes com o princípio da uniformidade? Aqui a história da estrutura do nosso universo liga-se à

história da teoria da relatividade; para sermos mais precisos, à teoria da relatividade generalizada. Perguntemos: quais são os possíveis modelos do nosso universo coerentes com os princípios da teoria da relatividade generalizada? E com o princípio da uniformidade? E com o desvio para o vermelho?

Para falar verdade, o princípio da uniformidade e a lei do desvio para o vermelho restringem os modelos possíveis, relativistas, do nosso universo.

São, no entanto, possíveis muitos modelos, e provas derivadas da observação não são suficientemente conclusivas para permitir uma escolha única. Mas, qualquer que sejam as características do nosso universo, pelo menos sabemos que todos os universos possíveis se podem dividir em duas classes. O nosso universo ou é *aberto* ou *fechado*. Esta afirmação, importante como é, não parece muito convincente. Talvez ela nos faça lembrar o facto trivial de que uma porta pode estar aberta ou fechada. No entanto, o conhecimento destas duas possibilidades é uma grande descoberta. Nos princípios do século XIX o dizer-se que o universo era fechado não teria significado. Nessa época só um espaço euclidiano era admitido como possível.

Quais são os sinais característicos de um universo aberto ou fechado?

Comecemos pelo universo fechado. O universo das criaturas bidimensionais, vivendo numa esfera, seria um universo fechado. Lembremo-nos de que para elas um raio luminoso regressaria ao ponto de partida.

O nosso universo é talvez, do mesmo modo, um universo fechado, ainda que seja difícil descrever matemàticamente um «espaço esférico» tridimensional. Podemos, pelo menos, imaginar, em princípio, uma experiência decisiva para sabermos se o nosso universo

é fechado ou não. Lancemos um raio luminoso no espaço. Se, passado algum tempo, o raio regressar até nós, então o universo é fechado. Se o raio nunca voltar ao ponto de partida, nesse caso o universo é aberto. Estas experiências apresentam, evidentemente, algumas dificuldades técnicas, mas podemos deixar de as considerar. A maior dificuldade consiste na nossa falta de tempo; de acordo com o nosso conhecimento actual, seriam necessários biliões de anos para a luz percorrer todo o mundo e voltar até nós. Há, no entanto, a possibilidade de descobrir, duma forma indirecta, por meio do novo telescópio de cerca de 2,5 m, se o nosso universo é aberto ou fechado.

Podemos considerar o nosso universo como sendo fechado se suprimirmos uma dimensão e o compararmos com o universo das criaturas bidimensionais que vivem numa esfera. Prosseguindo nesta comparação, imaginemos pontos doirados escassa mas uniformemente distribuídos pela esfera; eles representam para nós as nebulosas do nosso mundo. E o desvio para o vermelho? Para responder a esta pergunta temos que complicar um pouco a nossa imagem bidimensional. Imaginemos que uma esfera se dilata como um balão sob crescente pressão. Esta esfera em expansão, que é melhor que uma esfera com um raio invariável, é o modelo bidimensional do nosso universo. Verificamos que este modelo satisfaz tanto o princípio da uniformidade como a lei do desvio para o vermelho. Na verdade, as nossas nebulosas — os pontos doirados no balão em expansão — continuarão distribuídas uniformemente, porque foram espalhadas uniformemente e porque a expansão conserva a forma esférica, modificando apenas o seu raio. As distâncias entre as nebulosas, medidas no balão, aumentarão. Um observador em qualquer das nebulosas verificará que as outras se afastam dele. É também claro que para

cada uma das nebulosas a velocidade da expansão das outras nebulosas parece ser proporcional à distância.

Examinemos agora a outra possibilidade, a do universo aberto. Aqui não é necessário suprimir uma dimensão, e por isso podemos voltar à imagem tridimensional do nosso espaço. É melhor considerarmos este universo de tipo aberto a partir duma perspectiva histórica.

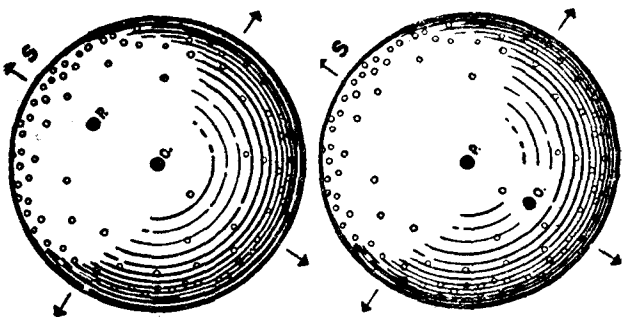
Outrora toda a matéria do nosso universo estava concentrada num ponto. Assim, todas as nebulosas estavam comprimidas juntamente. Então algo aconteceu, e toda a matéria explodiu como se fosse uma granada. As nebulosas começaram a afastar-se umas das outras a uma velocidade constante. Se julgarmos, pois, pelo que aconteceu com a nossa via láctea, as nebulosas que tinham maiores velocidades moviam-se para mais longe das outras. Hoje ainda se movem uniformemente.

Vemos que esta história do nosso universo nos dá a lei do desvio para o vermelho (proporcional às distâncias) e satisfaz igualmente o princípio da uniformidade. Quanto mais afastadas as nebulosas se encontram maior é a sua velocidade, porque sempre tiveram esta maior velocidade, mesmo quando concentradas num espaço mais pequeno. Conservam esta velocidade porque se movem uniformemente. As nebulosas mais próximas de nós têm velocidades menores, porque no tempo em que foram criadas, no tempo da concentração, tinham menor velocidade, e conservam essa menor velocidade. Além disso, verificamos também — ainda que seja um pouco mais difícil — que o princípio da uniformidade não é violado. Na verdade, todas as nebulosas estiveram juntas em determinada altura, e, apesar de podermos dizer que elas começaram a fugir da nossa via láctea, o mesmo podem afirmar os habitantes de qualquer outra via

láctea em relação a si. A mais veloz das nebulosas teria uma velocidade quase igual à da luz e toda a matéria do universo estaria contida numa esfera com o raio igual ao produto de c (velocidade da luz) por t_o (tempo que passou desde o momento da explosão até hoje). Qualquer observador pode representar para si essa esfera, sendo esta afirmação verdadeira para qualquer observador. A transição de um *sistema* (ou seja, de uma nebulosa) para outro é regida pela transformação formulada pela teoria da relatividade restrita, a transformação de Lorentz. Ela indica-nos como descrever os fenómenos de um *sistema* se conhecermos a descrição noutro *sistema*. Tomemos, por exemplo, a nossa galáxia como um ponto O e uma nebulosa muito afastada como um ponto P. P estará perto da periferia da esfera, S, com o raio ct_o e o centro em O. Mas o observador em P pensará ser o centro da esfera. Todas as nebulosas entre P e S parecerão estar, para o observador em O, situadas numa calote contraída, em comparação com o observador em P. Isto acontece porque elas se movem ràpidamente. É o resultado da contracção do comprimento no sentido do movimento, tal como era exigido pela teoria da relatividade restrita. Pela mesma razão, todas as nebulosas situadas a maior distância do que O parecerão estar contraídas sob a forma de uma taça para o observador na nebulosa P. A história de semelhante universo aberto seria a mesma para qualquer observador em qualquer nebulosa.

Só através de um cálculo pormenorizado se pode mostrar mais explìcitamente como tanto a lei do desvio para o vermelho como o princípio da uniformidade resultam de semelhante representação.

Quando explodiu o nosso universo? Pela observação do actual desvio para o vermelho podemos calcular que a expansão começou há muitos biliões de anos.



Num universo aberto todas as nebulosas entre P e S parecerão ao observador em O situadas na superfície contraída duma calote relativamente ao observador em P

Portanto, como conhecemos agora, pelo menos em esboço, as duas características possíveis do nosso universo, podemos perguntar: o nosso universo é aberto ou fechado? Como já foi dito, não há provas suficientes para responder a esta pergunta. Existem objecções sérias contra o conceito de um universo fechado, por causa da sua perfeição.

Um universo fechado seria, não só finito, mas também materialmente finito. Por isso, está em oposição com a ideia de evolução. Num mundo de matéria finita existiria, na melhor das hipóteses, um «regresso contínuo do semelhante», e nunca um movimento contínuo avante, do inferior para o superior, do mais simples para o mais complicado, uma cadeia

incessante de transformações qualitativas, de situações velhas para outras novas, nunca antes existentes.

Estas objecções desapareceram na representação de um universo aberto, em que tanto o espaço como o conteúdo material são infinitos. Para isso temos que sacrificar cómodos manejos matemáticos e quebrar a cabeça com acontecimentos a distâncias infinitas. A cosmologia relativista sofreu muitas vezes uma interpretação falsa, como que querendo significar que a matéria — tanto num universo fechado como num universo aberto — esteve em determinada altura concentrada num espaço apertado (com espessura finita, isto é, infinita!); como se a teoria da relatividade determinasse o «começo do mundo», o momento preciso da criação da matéria. Trata-se aqui apenas da tentativa de compreender a evolução das estrelas e dos sistemas de estrelas hoje existentes, a partir de uma situação anterior, quando ainda não existiam como tais.

O presente século alterou a representação do nosso mundo. Do átomo à estrutura do nosso universo vemos alterações revolucionárias, um rápido desenvolvimento que dificilmente pode ser comparado com qualquer outro na curta história da humanidade. Este desenvolvimento resultou em parte da necessidade material do homem e, se olharmos retrospectivamente, ele parece essencialmente determinado pelo estado anterior da ciência.

Considerada subjectivamente — do ponto de vista do investigador —, a evolução da ciência nem sempre é considerada através das necessidades práticas. Muitas considerações a respeito do átomo e do universo nasceram da sede de conhecimento do homem, do seu desejo de penetrar mais profundamente no desconhecido. O valor utilitário de muitas das nossas teorias pode ser nulo, mas elas ajudam-nos a conhe-

cer o mundo em que vivemos. O motivo impulsionador de Einstein na sua investigação pioneira foi precisamente essa sede de saber e a urgência da formulação de uma representação do mundo em que vivemos com uma maior unidade lógica. As suas experiências, aparentemente tão estranhas, ainda que essenciais, tornaram possível alcançar um alvo prático de grande significado para o futuro da humanidade — o desenvolvimento da energia atómica.

Tentei esboçar, em traços largos, os esforços do cientista para compreender a arquitectura do nosso universo. Estes esforços são essencialmente especulativos, pois saem das fronteiras da nossa observação. Encontramo-nos aqui na mesma situação do viajante numa estrada desconhecida, procurando alcançar um ponto em que seja possível saber onde conduz essa estrada. De qualquer maneira, conseguimos, nos últimos trinta anos, formular um novo problema e encarar possíveis soluções, ainda que não nos tivesse sido possível alcançar uma solução definitiva. Mas em ciência nunca existe uma solução «definitiva».

As nossas considerações cosmológicas nascem das ideias da teoria da relatividade, apesar de estarem longe do trabalho original de Einstein. Na história do pensamento humano elas representam um dos muitos caminhos que partem duma origem comum: a teoria da relatividade, criação de um homem.

CAPÍTULO V

A parte de Einstein na grande revolução inacabada

O nascimento da teoria quântica

A teoria da relatividade foi criada, com todas as suas características essenciais, por um homem e os seus princípios permanecem hoje invariáveis. Mas a teoria da relatividade forma apenas uma parte relativamente pequena do esforço comum de todos os cientistas que trabalham na criação de uma teoria consistente dos fenómenos naturais. Quase todos os físicos concordariam em que a grande revolução que transformou a física do nosso século reside, não na teoria da relatividade, mas na teoria dos *quanta*. A sua história é a história dos nossos esforços para compreender a matéria e a radiação — isto é, a natureza e a composição das partículas elementares a partir das quais o mundo da matéria e da radiação pode ser reconstruído. Sabemos hoje que o nosso mundo material, o lápis com que escrevo, a minha mesa, o meu corpo, a Terra, o Sol, os planetas, as estrelas, as nebulosas, tudo é constituído por porções de matéria de várias espécies: electrões, protões, positrões, neutrões e mesões. A teoria dos *quanta* trata das leis que des-

crevem a forma como a matéria é construída com essas partículas elementares e quais as forças que actuam entre elas, forças que são reveladas pelas riscas espectrais, pelos fenómenos radioactivos ou pela fissão. A história da física moderna é, em grande parte, a da teoria dos *quanta*.

Enquanto a teoria da relatividade é quase inteiramente a obra de um só homem que percorreu sòzinho o seu caminho solitário, a teoria quântica é o resultado da actividade de muitos homens que trabalharam isoladamente ou em conjunto, que seguiram passo a passo o nosso ainda incompleto conhecimento da matéria, da radiação e da sua mútua interacção. É uma história fascinante e complicada. Se pedissem a um físico para indicar o nome mais importante nesse desenvolvimento, ser-lhe-ia difícil responder e preferiria dar uma lista de nomes: Planck, Einstein, Bohr, De Broglie, Schroedinger, Heisenberg, Dirac, Pauli.

Por isso, se dissermos que a teoria quântica é a grande revolução científica do nosso século, verificamos que Einstein teve nela um papel muito importante, embora não único. Não nos é possível descrever aqui toda a revolução produzida na física pela teoria quântica. Muitos livros, mais ou menos difíceis de entender, foram e hão-de ser escritos sobre este tema. Estamos aqui interessados principalmente na contribuição de Einstein para esta revolução. Mas até este assunto é vasto de mais, e por isso nos limitaremos a discutir a mais importante das contribuições de Einstein.

Antes de o fazer é necessário esclarecer o nosso quadro, pois, pelo que acabámos de afirmar, podemos ter dado a impressão de que há, por assim dizer, duas correntes distintas na física moderna: uma, relativamente estreita, representada pela teoria da relatividade e outra, mais ampla, representada pela teoria

quântica. Um tal quadro seria totalmente falso. A teoria quântica não é independente da teoria da relatividade, e não é possível imaginá-lo sem a parte que a teoria da relatividade teve no seu desenvolvimento.

Sem dúvida, o início da teoria quântica foi independente da teoria da relatividade. Reside no trabalho de Planck, no começo do século XX, cinco anos antes do nascimento da teoria da relatividade restrita. A contribuição mais importante de Einstein foi apresentada num trabalho publicado nos começos de 1905, no mesmo ano e no mesmo volume dos *Annalen der Physik* em que foi impresso o trabalho sobre a teoria da relatividade. (Como havemos de ver, estes não foram os únicos trabalhos de Einstein que apareceram neste mesmo volume. A Repartição Federal Suíça de Registos de Patentes devia ser um bom lugar para trabalhar!).

Só até 1905 é possível tratar independentemente as teorias quântica e da relatividade. Mais tarde ambas as teorias se confundem. As famosas contribuições de De Broglie e de Dirac sobre a física quântica estão tão estreitamente relacionadas com a teoria da relatividade que podem ser tratadas em livros sobre qualquer dos assuntos. Usando linguagem técnica, diria que se conseguiu um grande progresso na teoria quântica, fazendo com ela uma invariante de Lorentz. Isto foi feito por Dirac em 1928. Um outro exemplo importante da conexão entre a teoria quântica e a relatividade é a energia atómica e o seu aproveitamento. Aqui as ideias decisivas começam com a teoria da relatividade, na relação entre massa e energia; mas foi a teoria quântica que revelou as propriedades da matéria e a desintegração dos elementos que tornaram possível a energia atómica. A influência da relatividade sobre a teoria quântica constitui, na verdade, um capítulo muito importante na história da física. No julgamento da influência das ideias de Eins-

tein na física moderna não podemos de forma alguma esquecer esta fase.

Ao narrar o papel de Einstein na grande revolução quântica temos de voltar ao início da nossa história, a 1905. Mas, antes de o fazer, temos que traçar um esboço das experiências científicas e das ideias teóricas que levaram à descoberta de Einstein. Temos mesmo, durante algum tempo, que voltar ao século XVII, aos trabalhos de Newton e Huygens.

No século XVII foram formuladas duas teorias diferentes da luz por dois homens célebres: Newton e Huygens. Eram elas a teoria *corpuscular* e a teoria *ondulatória*.

A grande obra de Newton, *A Óptica*, contém a descrição das suas experiências sobre a dispersão da luz e uma perfeita formulação da sua teoria corpuscular. De acordo com Newton, a luz comporta-se como se fosse formada de corpúsculos: moléculas sem peso que se movem com a velocidade da luz. Na teoria de Newton o fenómeno luminoso é explicado por uma representação mecânica. As suas partes componentes são moléculas sem peso e o seu movimento.

Mas a teoria rival, de Huygens, é também de natureza mecânica. Formulada na mesma altura, competiu com a teoria de Newton pela supremacia no campo dos fenómenos ópticos. Segundo Huygens, a luz é uma onda. Ao falarmos a respeito de ondas temos que distinguir entre a sua propagação e o movimento das partículas materiais, que formam o meio pelo qual as ondas se movem. Do mesmo modo, se analisarmos as vias pelas quais os boatos se propagam, temos que distinguir entre a propagação do boato e os movimentos dum boateiro; ele pode ir só de sua casa para a do seu vizinho e voltar, mas o boato espalhar-se-á ràpidamente em todas as direcções, partindo da sua origem. As moléculas da água, no

caso de uma onda de água, movem-se, do mesmo modo, de cima para baixo, mas a onda provocada por uma pedra lançada à água movimenta-se em linha recta a partir da origem. Qual é, segundo Huygens, o meio pelo qual as ondas luminosas se propagam? É um meio sem peso e transparente que enche todo o universo: o éter. Foi assim que surgiu o conceito de éter.

Voltemos de novo aos princípios de que partimos. Temos de o fazer, porque a grande obra de Einstein na teoria quântica está relacionada com a física da luz, ao passo que a sua grande obra na teoria da relatividade se relaciona com a geometria da luz. Isto tornar-se-á claro quando discutirmos os *quanta* luminosos, ou fotões; mas antes de o fazer temos que penetrar fundo no passado.

Sempre que falamos duma onda, os princípios essenciais que descrevemos são a velocidade de expansão e o comprimento da onda. Por comprimento de onda queremos significar a distância (num dado momento) de um pico da onda até ao seguinte, ou de uma cava até à mais próxima. De acordo com a teoria das ondas luminosas, cores simples diversas são caracterizadas por diferentes comprimentos de onda.

Temos assim duas teorias diferentes: a corpuscular e a ondulatória. Na região das impressões dos nossos sentidos verificamos que existem luzes com cores diferentes. Na linguagem corpuscular isto significa que existem corpúsculos de natureza diferente. Na linguagem da teoria ondulatória, que existem comprimentos de ondas diferentes.

É perturbador ter duas teorias distintas, pois temos de admitir que a luz ou pode ser uma onda ou uma emissão corpuscular, mas não ambas as coisas simultâneamente. O fim de uma teoria é organizar e explicar acontecimentos, de forma a resultar um quadro simples a partir do qual possam ser deduzidos os

fenómenos e as leis naturais. Se tivesse sido possível, no tempo de Newton, explicar os fenómenos conhecidos tanto com uma teoria como com a outra, não haveria bases para uma escolha absoluta entre as duas; esta era, afinal, a situação naquele tempo. (A última destas frases é uma simplificação de certo modo grande, mas podemos perder a representação, no seu conjunto, se procurarmos ser exactos de mais). Deste modo, ambas as teorias poderiam ter sido consideradas como verdadeiras nos séculos XVII e XVIII. Mas no século XIX já o mesmo não aconteceu. A situação alterou-se radicalmente com os trabalhos de Young e Fresnel. Tornou-se conhecido um novo fenómeno, que foi profundamente investigado, e uma das teorias deixou de ser aceitável. Foi a teoria de Huygens que surgiu vitoriosa no século XIX.

Porquê?

Porque apareceu um novo fenómeno: a difracção da luz. Vamos descrever uma experiência simples e pedimos aos defensores das teorias corpuscular e ondulatória que prevejam os resultados. Se as suas previsões forem diferentes — e só então —, teremos uma forma de decidir entre ambas as teorias: a corpuscular, de Newton, e a ondulatória, de Huygens.

Eis uma das experiências que escolhemos entre as muitas que existem deste género: temos uma fonte luminosa diante da qual colocamos uma pequena abertura circular. O que aparecerá num *écran* sobre que a luz incide depois de ter passado por essa abertura?

Eis a resposta de um adepto da teoria corpuscular, de Newton:

«As partículas luminosas movem-se em linha recta. Passam através do furo circular e movem-se dentro de um cone formado pela fonte de luz e pelas linhas rectas que ligam a fonte com a abertura. No *écran* veremos sombra no sítio não alcançado pela luz e

luz na região onde ela incide. A transição entre luz e sombra será nítida».

Lembremo-nos desta previsão que afirma que, por pequeno que seja o orifício, haverá sempre uma transição brusca da luz para a sombra.

A previsão do defensor da teoria ondulatória, de Huygens, será diferente; ele raciocinará assim:

«Imaginemos, num rio, ondas pequenas movendo-se na direcção de um grande navio. Elas não alcançarão o outro lado do navio, que formará, portanto, uma sombra. Mas substituamos agora o grande navio por um barquito ou por um tronco de árvore, e então as ondas curvar-se-ão e irão para o outro lado do obstáculo. Teremos assim ou uma sombra distinta, ou nenhuma sombra, dependendo do facto de os obstáculos, em comparação com o comprimento da onda, serem grandes ou não. Se isto for verdadeiro, algo semelhante se passará com a experiência da projecção da luz através da abertura circular. Se fizermos essa abertura cada vez mais pequena, chegará um momento em que não haverá qualquer sombra. De acordo com os meus cálculos, em vez de uma área de sombra e outra de luz, acharemos, alternadamente, círculos escuros e claros. A transição da luz para as trevas será feita por meio de círculos escuros e claros, ou talvez até círculos coloridos, se a fonte emitir luz de várias cores, isto é, luz com vários comprimentos de onda. Logo que possamos descobrir semelhante fenómeno, deduziremos com ele, e com os meus cálculos, qual é o tamanho da onda luminosa emitida pela fonte. Afirmo assim que para orifícios suficientemente pequenos aparecerão anéis escuros, luminosos ou até coloridos, enquanto os meus colegas que acreditam na teoria de Newton prevêem o aparecimento de luz e sombra apenas. Eis aqui uma diferença essencial entre as nossas teorias».

Foi esta previsão da teoria ondulatória que provou ser verdadeira. Estabeleceu-se, deste modo, a preponderância da teoria ondulatória no século XIX. O fenómeno da difracção permite-nos medir o comprimento das ondas de luz. Esse comprimento, em relação com as dimensões humanas, é, evidentemente, muito pequeno. Foi esta a única razão pela qual foi aceite, durante tanto tempo, a validade da teoria corpuscular. Não nos esqueçamos, porém, de completar a representação de Newton, pois veremos em breve que Einstein voltou a ela e insuflou a essa teoria morta um novo sopro de vida.

As experiências sobre a difracção da luz permitem-nos medir o comprimento de onda do espectro visível. De todas as cores do arco-íris, é o violeta que tem o comprimento de onda menor e o vermelho o maior. Nos séculos XIX e XX a gama de comprimentos de onda aumentou. Foram descobertos os raios X, cujo comprimento de onda é menor do que qualquer raio de luz visível, e os rais gama, mais curtos ainda do que os rais X. Temos agora as ondas do rádio, que são maiores do que qualquer radiação visível. Este grande campo de radiação é explicado por uma única teoria: a teoria do campo de Maxwell. Era esta a situação no período do fim do século XIX e começo do século XX.

As grandes ideias e as novas teorias nascem de conflitos, de dificuldades e contradições para que parece não haver solução possível. Foram estas as condições que levaram às mais importantes teorias da física do século XX: a teoria quântica e a teoria da relatividade.

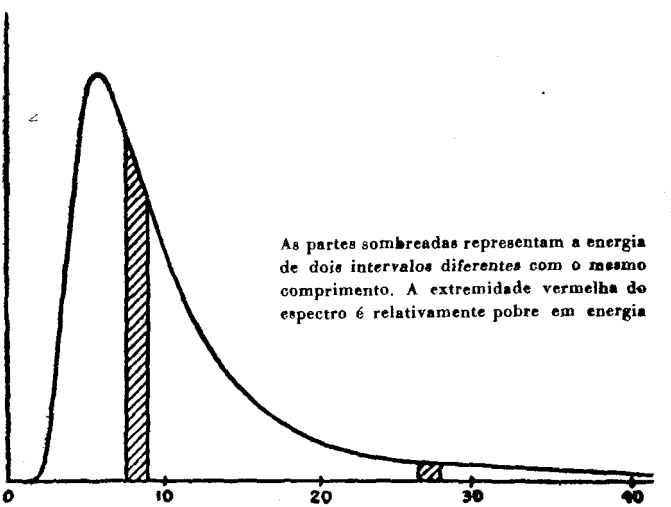
As dificuldades que existem por detrás da teoria quântica são menos espectaculares e pareciam de início menos profundas do que as que conduziram à teoria da relatividade. As características mais profundas da teoria

quântica apareceram em período posterior. Se quisermos apresentar a teoria quântica de um ponto de vista lógico, será mais cómodo ignorar e flanquear em parte o seu desenvolvimento histórico, que, em comparação com a teoria da relatividade, parece mais acidental. Mas, apesar disso, seguiremos aqui o desenvolvimento histórico, porque as dificuldades precoces influenciaram o pensamento de Einstein e conduziram à sua teoria dos fotões.

Qual foi o problema da física que levou ao aparecimento da teoria quântica? Pensemos no espectro visível do Sol. A luz emitida pelo Sol é branca, mistura de todas as cores visíveis. É possível decompor esta luz branca nos seus elementos fazendo-a passar através dum prisma. A natureza faz-nos o mesmo no magnífico fenómeno do arco-íris. Na linguagem da teoria ondulatória, podemos dizer que no espectro visível do Sol todas as ondas estão presentes, a começar pelo comprimento de onda menor, correspondente ao violeta, até ao maior, correspondente ao vermelho.

O Sol é a fonte de energia propagada por intermédio de ondas de comprimentos diferentes. Cada parte do espectro, ou seja, cada cor, traz consigo uma certa quantidade desta energia. Dividamos agora este espectro, por exemplo, em dez partes, isto é, em dez pequenos intervalos, de acordo com os comprimentos de onda. Que quantidade de energia está contida em cada uma destas secções? Terá cada uma delas a décima parte da energia total? Mesmo uma experiência superficial nos mostrará que não é assim. A energia está dividida em partes desiguais pelas secções. Qual é, porém, a lei reguladora desta divisão? Que quantidade de energia conterá, por exemplo, a terceira secção ou a sétima? Qual é a distribuição de energia solar pelas várias partes componentes do espectro? Se desejarmos ter um conhecimento preciso

da distribuição de energia pelo espectro, temos que o dividir numa quantidade maior de partes, em centenas ou mesmo milhares delas, em vez de apenas dez. A nossa pergunta pode ser respondida experimentalmente; isso foi feito no século XIX. A solução é dada melhor por meio de um diagrama. Numa linha horizontal indiquemos todos os possíveis comprimentos de onda, desde zero até ao infinito. Nestas condições, uma linha curva indicará a energia que pertence a cada intervalo. As partes sombreadas dão-nos a energia de dois intervalos diferentes com o mesmo comprimento. Junto à região do azul — cerca de 4 800 Å — encontra-se energia em grande quantidade (10 milhões de Å [isto é, ångstroms] = 1 mm). A extremidade vermelha do espectro é relativamente pobre em energia.

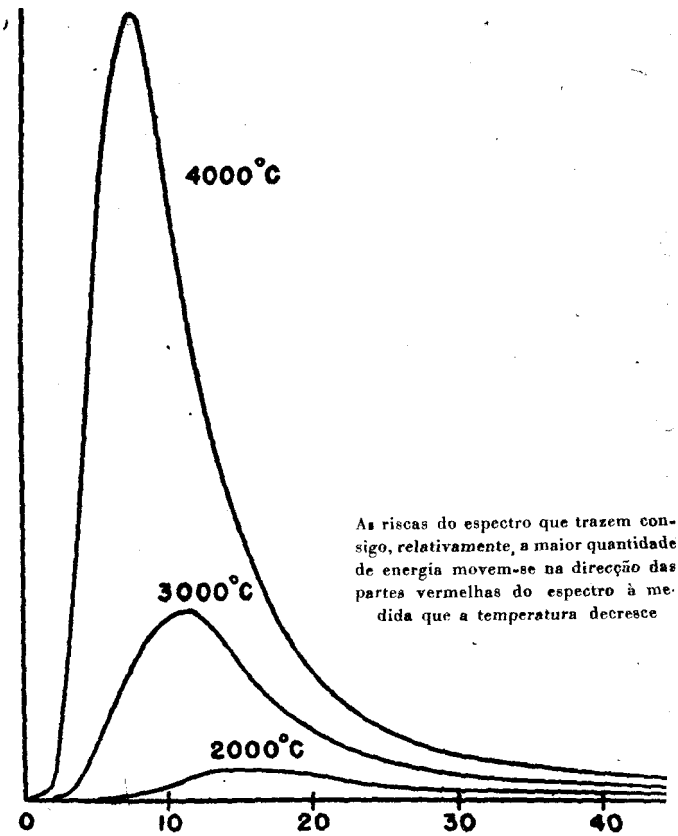


As partes sombreadas representam a energia de dois intervalos diferentes com o mesmo comprimento. A extremidade vermelha do espectro é relativamente pobre em energia

Surge então a pergunta: de que forma se alteraria a distribuição de energia se descesse a temperatura do corpo emissor de radiação? Esta pergunta foi também respondida pela experiência. É-nos possível criar sóis em miniatura que, apesar de mais frios do que o próprio Sol, emitam todas as espécies de radiações. Podemos investigar a distribuição de energia dos espectros destes sóis e descobrir de que forma se altera a distribuição de energia quando a temperatura diminui. Do mesmo modo que anteriormente, podemos desenhar curvas diferentes, indicando temperaturas diferentes e que nos mostram de que forma a distribuição de energia varia com a temperatura. Verificamos pelas curvas que a energia emitida diminui com a diminuição da temperatura. Isto é evidente. Mas há um outro fenómeno, mais interessante e inesperado. As riscas do espectro, que trazem consigo, proporcionalmente, a maior quantidade de energia, movem-se na direcção do vermelho, ou seja, na direcção dos maiores comprimentos de onda. A uma temperatura de 6 000 °C a energia maior está concentrada no azul. Mas a 3 000 °C está pronunciadamente perto do vermelho. A energia, em qualquer parte do espectro, depende de dois factores: o comprimento de onda e a temperatura do corpo emissor da luz. Em linguagem matemática diríamos que a energia é função do comprimento de onda e da energia.

Temos até agora descrito apenas os resultados de experiências e medições. Mas como explicar teòricamente estes resultados? Os físicos do século XIX julgavam saber o bastante a respeito da matéria que emite radiações e sobre a própria radiação para poderem deduzir a fórmula teórica que indicasse a distribuição precisa da energia. Era, sem dúvida, possível deduzir uma fórmula, mas essa fórmula estava errada.

Todas as deduções, todas as derivações teóricas — e há muitas — levaram a resultados que contradizem a experiência. Os físicos não podiam explicar os máximos das diferentes curvas experimentais e o desvio desses máximos na direcção do vermelho do espectro com a diminuição de temperatura.



As riscas do espectro que trazem consigo, relativamente, a maior quantidade de energia movem-se na direcção das partes vermelhas do espectro à medida que a temperatura decresce

Desta dificuldade nasceu a teoria quântica. O seu nascimento deu-se a 14 de Dezembro de 1900, dia em que Max Planck leu um trabalho sobre este assunto na Associação Alemã de Física, em Berlim. Ele deduziu a fórmula exacta da radiação, mas só o pôde fazer introduzindo conceitos que, de acordo com a física clássica, eram novos, estranhos e perturbadores.

Quanta

Tanto na vida como em ciência lidamos com duas espécies de quantidades: *contínuas* e *descontínuas*. Se indicamos o número de alunos numa aula, só podemos usar números inteiros. O número de estudantes só pode variar de uma ou mais unidades. A afirmação «tenho hoje na aula 25,867 alunos» é absurda. A vossa fortuna, ou a de qualquer outra pessoa, é também uma quantidade descontínua. Podemos contar as economias até aos centavos, mas não além. Podemos dizer que nos Estados Unidos um centavo é o *quantum* elementar da moeda. Logo que estabelecemos esse *quantum*, todo o dinheiro da América pode ser expresso usando um número inteiro, que indica o número desses *quanta* elementares. Não podemos alterar o número de estudantes ou a quantidade de dinheiro usando um número arbitrário. Só podemos fazê-lo por meio de *quanta*. Um estudante é um *quantum* elementar no primeiro caso; no segundo será um centavo. Estas quantidades (número de estudantes e dinheiro) não podem variar de modo contínuo. Só podem fazê-lo descontìnuamente.

Se viajamos de comboio, escolhemos a estação onde termina a nossa viagem, mas as possibilidades de escolha, quando escritas em termos de distâncias em relação à grande estação central, variarão des-

contìnuamente. Mas de automóvel podemos ir onde quisermos. Todos os pontos na estrada onde se pode ir de automóvel formam um contínuo. Podemos variar as distâncias tanto quanto desejarmos.

Temos pois, na vida prática, quantidades contínuas e descontínuas. Perguntamos: quais são as quantidades contínuas e quais são as descontínuas? Esta pergunta não tem sentido. Uma quantidade que num caso foi considerada contínua pode ser depois considerada descontínua. Talvez nos possamos exprimir melhor de outra maneira: o mesmo conceito pode ser considerado contínuo na descrição de determinados fenómenos e descontínuo na de outros fenómenos mais complicados. Isto não deve causar admiração. Se quisermos vender a a areia do Sáara às toneladas, podemos considerá-la contínua; mas se compararmos o feitio de dois grãos de areia ao microscópio, de forma alguma poderíamos considerá-los contínuos. O mesmo se passa em ciência. Quantidades que eram consideradas contínuas num caso têm de ser consideradas descontínuas noutro. Foi a teoria quântica que nos ensinou a considerar descontínuos alguns conceitos que anteriormente eram considerados contínuos.

Discutamos agora o aspecto contínuo ou descontínuo dos conceitos físicos mais importantes.

O *tempo* é um conceito contínuo. Os períodos de tempo podem mudar por um número arbitràriamente pequeno.

O *espaço* é contínuo. As distâncias podem mudar por um número arbitràriamente pequeno.

A *energia* é contínua, de acordo com a física clássica. Pode aumentar ou diminuir por um número arbitràriamente pequeno.

Lembremo-nos agora de que a unidade de energia adoptada é o erg: trabalho produzido por 1 dyne no percurso de 1 cm. Um dyne é a força que imprime

a 1 g a aceleração de 1 cm por segundo em cada segundo. Talvez baste que nos lembremos que, omitindo estas unidades técnicas, um erg é uma unidade de trabalho diminuta, muito boa para descrever o trabalho de formigas ou de moscas, mas muito pouco adaptável na descrição do trabalho dum cavalo ou da água numa barragem. Quero dizer com isto que o trabalho nestes casos, se fosse descrito em ergs, seria representado por números incòmodamente enormes.

Deste modo, nos fins do século XIX, tempo, espaço e energia eram considerados contínuos.

E a *massa?* Em mecânica clássica a massa também era considerada contínua. Na nossa experiência diária, no nosso lar, calculamos alterações arbitrárias nas quantidades existentes de manteiga, por exemplo. No entanto, o grande progresso da ciência no século XIX reside no reconhecimento da estrutura atómica da matéria; na ideia de que cada elemento é composto de átomos e que um átomo é o *quantum* elementar desse elemento. Assim, por exemplo, o átomo do hidrogénio tem a massa de 0,00000000000000000000000017 g.

Não é possível variar a massa do hidrogénio por qualquer quantidade mais pequena do que aquela. Assim, o *quantum* elementar do hidrogénio é pequeno mas finito. Esta foi uma grande descoberta. Este quadro era muito diferente do quadro newtoniano, em que a massa era considerada contínua.

Desde muito novo que Einstein ficara impressionado pela nova representação atómica que surgira no século XIX. Ainda que discutamos agora a estrutura atómica da matéria, está bem que divaguemos um pouco e mencionemos, ainda que ràpidamente, outra das contribuições de Einstein, que nada tem a ver com a relatividade nem com a teoria quântica. Refiro-me ao trabalho de Einstein que apareceu em

1905, no mesmo volume XVII dos *Annalen der Physik*, em que há três trabalhos seus: um sobre a teoria da relatividade, outro sobre o efeito fotoeléctrico, a que nos referiremos dentro em pouco, e o terceiro sobre o *movimento browniano*. Este último é mais importante do que os outros dois. No artigo sobre o movimento browniano Einstein procurou um fenómeno que demonstrasse tão claramente a estrutura atómica da matéria que convencesse mesmo os mais cépticos. Assim, previu e descreveu o movimento browniano, fenómeno que aparece se a matéria tem uma estrutura granular. Einstein não sabia que esse fenómeno era conhecido há oitenta anos. Apresentou deste modo a teoria do movimento browniano sem saber que esse movimento já fora observado anteriormente.

Em 1827 Brown reparou que os grânulos das plantas, partículas orgânicas e inorgânicas, ou qualquer matéria pulverizada de forma que o comprimento de cada partícula seja cerca de 1/2 000 cm, quando colocados em água e observados ao microscópio, mostram um movimento de trepidação. Estas partículas, ou, como ficaram sendo conhecidas, as *partículas brownianas*, movem-se constantemente, percorrendo trajectórias fantàsticamente quebradas. Nunca param; o seu movimento nunca cessa.

Einstein previu que semelhante fenómeno deve acontecer devido à estrutura atómica da matéria. A água, ou qualquer outro meio em que essas partículas sejam lançadas, consta de *quanta* elementares de matéria em movimento constante, fazendo andar à volta as partículas brownianas. O movimento browniano constitui, por assim dizer, uma amplificação do estado de movimento das moléculas da água. Visto ao microscópio, o movimento resulta da estrutura granular da água, sendo provocado pelo bombardeamento cons-

tante das partículas brownianas pelas pequenas partículas da água. De facto, o estudo do movimento browniano e o conhecimento da teoria desenvolvida por Einstein permitem-nos conhecer alguma coisa acerca da massa das partículas bombardeantes. Há pouco referi-me à massa do átomo de hidrogénio. Foram as experiências baseadas no movimento browniano e na teoria, tal como foi formulada por Einstein, que permitiram encontrar esse valor.

Mencionei aqui, ràpidamente, a história do movimento browniano e da sua teoria, tal como está desenvolvida no belo trabalho de Einstein. O meu intento é mostrar a influência de Einstein na nossa civilização moderna; a história do movimento browniano não é aqui de grande importância. Independentemente de Einstein, mas sensìvelmente ao mesmo tempo, a teoria do movimento browniano foi formulada por Smoluchowski, meu professor em Cracóvia. Smoluchowski gastou grande parte da sua curta vida a estudar a estrutura atómica da matéria.

O essencial nesta história, além do problema geral, quase filosófico, que levou à teoria da relatividade e às teorias acerca da estrutura do nosso universo, é o facto de Einstein se ter entusiasmado com a estrutura atómica da matéria. Embora, como temos visto, aparecessem em cada ano trabalhos de Einstein sobre diferentes assuntos, é evidente para qualquer cientista que eles foram o resultado de anos de trabalho e meditação.

Para terminarmos com a estrutura descontínua da matéria, queremos apenas dizer que nos fins do século XIX as teorias atómicas eram, duma maneira geral, aceites por todos os cientistas.

A *electricidade* é contínua ou descontínua? A electricidade era considerada contínua, como o fora

a massa no começo da ciência. Mas a descoberta dos electrões, no fim do século XIX, obrigou-nos a uma revisão das nossas noções. Os electrões são os *quanta* mais pequenos da electricidade negativa. Infelizmente, temos dois *quanta* elementares para a electricidade positiva: os protões pesados e os positrões negativos.

Estes *quanta* da electricidade são, simultâneamente, as porções de que se compõem os átomos. No século XX descobrimos que o átomo não é um *quantum* elementar da matéria, mas se compõe de porções elementares: electrões, protões, positrões, neutrões, mesões. A história que nos conta a maneira como estes átomos são formados dessas porções é essencialmente a história da teoria dos *quanta*.

Mencionámos até aqui três quantidades, consideradas na física clássica como contínuas: tempo, espaço, energia. A teoria quântica, que se tornou mais tarde a teoria da estrutura do átomo, começou com a descoberta de Planck. É possível agora formular a grande conclusão de Planck: retirou a energia da categoria das noções contínuas e colocou-a na càtegoria das noções descontínuas.

Tal como acontece com a massa e com a electricidade, a energia tem uma estrutura granular.

Lembremo-nos de que o objectivo de Planck era descobrir a verdadeira lei da radiação e que todas as suposições clássicas levavam, inevitàvelmente, a uma lei falsa. Ao admitir que a energia só pode ser emitida ou absorvida em *quanta*, Planck deduziu a verdadeira lei da radiação, depois confirmada pela experiência duma forma extraordinária. Este êxito foi o início da teoria quântica. Os fenómenos que confirmaram a estrutura granular da energia tornaram-se, mais tarde, tão numerosos que a teoria dos *quanta* veio a ser instrumento normal de todos os físicos.

Agora perguntamos: qual é o *quantum* elementar de energia? A resposta a esta pergunta não é fácil. Nos Estados Unidos o *quantum* elementar de dinheiro é o centavo. Dizer que tenho no banco a centésima parte de um centavo não faz sentido. Mas na Grécia o *quantum* elementar é o dracma, que vale realmente a centésima parte do centavo do dólar. Assim, é possível a um grego afirmar, se possuir um dracma, que possui a centésima parte dum centavo.

Já leram a história *The Bottle Imp*, de Robert Louis Stevenson? Nela um homem comprou uma garrafa para salvar a vida de sua mulher. Pode fazer com ela tudo, até milagres, mas se a possuir ainda quando morrer, a sua alma pertencerá ao Diabo. Tem pois que fazer o seu milagre depressa e vender depois a garrafa. Mas deve vendê-la por menor preço do que aquele por que a comprou. Eis as regras do jogo; se as alterar, a garrafa persegui-lo-á. Toda a história assenta no facto de haver um *quantum* elementar de dinheiro, e não teria sentido se o dinheiro fosse uma quantidade contínua. O pobre homem, que quer salvar a vida da mulher doente, comprou a garrafa por um *farthing* (a moeda inglesa de menor valor), e vendeu, assim, a sua alma ao Diabo. Conta a sua inquietação à mulher, que encontra uma solução. Irão para uma ilha francesa onde cinco cêntimos franceses equivalem a um *farthing;* aí se desembaraçam da garrafa. Como Stevenson viveu num mundo estável, a história termina assim.

Da mesma maneira, no caso da energia, não há um *quantum*, mas vários *quanta* de energia. O Sol, ou qualquer outro corpo, emite ou absorve radiações. Certamente que isto se passa em *quanta*, mas a grandeza do *quantum* depende do comprimento de onda das radiações que ele emite ou absorve. Quanto menor for o comprimento de onda maior será o *quantum*.

Assim, a matéria emite ou absorve radiações violetas em porções — isto é, *quanta* — duas vezes maiores do que se fossem radiações vermelhas. Os *quanta* de energia dos raios Röntgen (de pequeno comprimento de onda) são maiores do que os do espectro visível. Deste modo, por exemplo, se determinarmos agora a grandeza do *quantum* para o extremo vermelho do espectro, saberemos a grandeza, ou, antes, a pequenez, do *quantum* para qualquer outra radiação. Evidentemente, o *quantum* de energia deve ser, de qualquer maneira, muito pequeno, pois doutra forma a estrutura granular das radiações não teria permanecido oculta durante tanto tempo. Um erg, unidade de energia muito pequena, contém 400 000 milhões de *quanta* pertencentes às radiações vermelhas e 200 000 milhões de *quanta* pertencentes às radiações violetas. Na verdade, os *quanta* são muito pequenos.

Como se achará o *quantum* de energia pertencente a uma radiação de um determinado comprimento de onda? Eis a solução apresentada por Planck: divide-se a velocidade da luz (30 000 000 000 cm por segundo) pelo comprimento de onda expresso em centímetros e multiplica-se pela *constante de Planck*, que será sempre, e em toda a parte, representada por *h*. Achamos assim, expresso em ergs, o *quantum* de energia pertencente a determinada radiação. Qual é o valor de *h*? Ei-lo:

$$h = 0,\ 000000\ 000000\ 000000\ 000000\ 00655$$

Evidentemente, é um valor pequeno, pois que os *quanta* de energia são pequenos. (A constante *h*, de Planck, tem a «dimensão» de um erg por segundo. A «dimensão» indica-nos a forma como varia o número representativo de *h*, se mudarmos as unidades de tempo e energia).

Deste modo, uma nova ideia revolucionária foi introduzida na física, e com ela desapareceu uma contradição entre teoria e experiência. Foi uma das ideias mais fecundas de toda a história da ciência.

Antes de entrarmos de novo na obra de Einstein diremos algo sobre as consequências filosóficas da descoberta de Planck. Como sempre tem acontecido na história da física, necessitamos de alterar os nossos conceitos fundamentais se queremos contar com o crescente enriquecimento das nossas experiências. Uma longa cadeia de raciocínios leva-nos destas considerações até à derivação da verdadeira fórmula da radiação. Na física moderna a cadeia de deduções que leva dos conceitos até às conclusões que podem ser confirmadas pela observação tem-se tornado cada vez mais longa. O desenvolvimento da ciência é um processo biológico. Somos forçados a modificar constantemente os nossos conceitos se queremos compreender o mundo em que vivemos.

Fotões

Faltava às ideias de Planck uma conclusão. Elas foram o início de um movimento a que Einstein deu um novo impulso, porque tinha coragem e independência para tirar conclusões novas e de grande alcance.

Reconhecemos no trabalho de Einstein sobre a teoria dos *quanta* a mesma característica anterior: originalidade. Os homens com imaginação originam revoluções, pois vêem com clareza erros na ordem antiga e têm a coragem de romper com a tradição. Estes homens cuidam mais da compreensão do que do conhecimento. Einstein conhecia a teoria de Planck; embora reconhecesse a sua importância, sabia que

era como que uma ajuda para achar uma determinada fórmula: a da relação da energia das radiações com o comprimento de onda e a temperatura. Isto foi, na verdade, feito de uma forma extraordinária.

A teoria ondulatória da luz trata de radiações. Na sua forma primitiva, a teoria quântica de Planck diz respeito a emissões e absorções. Imaginemos que radiações com determinado comprimento de onda incidem sobre um corpo que as absorve; esta absorção ocorre em *quânta*. O corpo absorve pequenas porções dessas radiações; cada uma delas tem uma determinada grandeza. O que Einstein conseguiu foi uma modificação básica do princípio da radiação. Ponhamos de parte, pelo menos de momento, a teoria ondulatória da luz. Admitamos, com Einstein, que a própria luz tem uma estrutura granular, que se compõe de grãos, de projécteis, de *quanta* que se deslocam no espaço com a velocidade da luz. Como é semelhante esta imagem à da teoria corpuscular de Newton! De certo modo, Einstein ressuscitou a teoria corpuscular de Newton, embora os seus princípios possuam agora uma profundidade que não podiam ter tido no tempo de Newton. A forma original, primitiva, da teoria de Newton é, pois, modificada; o seu alcance é aprofundado. No entanto, as ideias essenciais são muito semelhantes. Os grãos da energia luminosa, os fotões, substituem os corpúsculos de Newton. Segundo Einstein, a luz é formada por uma chuva de fotões e o fotão é o *quantum* elementar de energia.

Mas Einstein, ao ressuscitar a teoria de Newton, não abandonou a teoria ondulatória da luz. O fenómeno da difracção e o êxito da teoria ondulatória da luz são muito importantes para consentir tal coisa. Einstein não só ressuscitou a teoria newtoniana, como construiu uma ponte entre as teorias de Huyghens e Newton. Einstein como que reconciliou os

dois antigos inimigos, ao deixá-los observar os fenómenos de um plano mais elevado de compreensão.

Este período do trabalho de Einstein sobre a teoria quàntica da radiação é revolucionário, mas, ao mesmo tempo, conciliador. Não há nisto qualquer contradição. A sua teoria da luz reconcilia as concepções de Huyghens e de Newton, e, no entanto, esta reconciliação foi realizada com o aparecimento de ideias novas e revolucionárias.

Einstein diz essencialmente que alguns fenómenos luminosos podem ser descritos com êxito pela terminologia ondulatória e que outros o são pela terminologia corpuscular ou dos fotões. É possível traduzir certas frases duma terminologia para a outra, da mesma forma que se pode traduzir um livro duma língua para outra. Eis alguns exemplos:

Terminologia da teoria ondulatória	*Terminologia da teoria quântica*
1. O espectro visível contém ondas de vários comprimentos.	1. O espectro visível contém fotões de várias energias.
2. O comprimento de onda do extremo vermelho do espectro é cerca de duas vezes maior que o comprimento de onda do extremo violeta.	2. A energia dos fotões no extremo vermelho do espectro é cerca de metade da do extremo violeta.
3. As radiações homogéneas têm um comprimento de onda determinado.	3. As radiações homogéneas são formadas de fotões com energia determinada e igual.

À esquerda deste nosso dicionário em miniatura temos as palavras «comprimento de onda»; o com-

primento de onda é medido em centímetros. À direita temos as palavras «energia dos fotões»; esta energia é medida em ergs. O elemento essencial da teoria de Einstein não é apenas a nova representação corpuscular, ou, antes, fotónica, mas também a ponte, a transição do conceito de comprimento de onda para o de energia fotónica. Para cada comprimento de onda existe uma determinada energia fotónica e para cada energia fotónica um determinado comprimento de onda. A fórmula para esta transformação é a mesma que fora antes dada por Planck. Mas Einstein aplicou-a agora aos fotões. É ainda hoje a fórmula mais elementar e mais importante da teoria quântica: a velocidade da luz dividida pelo comprimento de onda e multiplicada pela constante de Planck dá a energia do fotão correspondente. Esta fórmula relaciona a teoria ondulatória e a teoria quântica da radiação.

Consideremos agora, ràpidamente, o campo das radiações e deixemos de lado a teoria ondulatória. Interpretemos a radiação como uma chuva de fotões. As ondas hertzianas são compostas de fotões com energia muito pequena; na linguagem da teoria ondulatória diremos que o seu comprimento de onda é relativamente grande. Podem ser comparadas com pequenas bolas de algodão ou de lã. Temos depois o espectro visível. Os seus fotões são como balas de revólver. Os fotões dos raios ultravioletas são como balas de espingarda. Finalmente, os dos raios X são como que uma chuva de projécteis de artilharia pesada.

De que forma se pode justificar está nova representação corpuscular? Existem quaisquer factos experimentais que podem ser explicados pela teoria einsteiniana da radiação, mas que não podem sê-lo pela teoria ondulatória? Existem. Ocupar-nos-emos aqui do fenómeno simples conhecido pelo nome de *efeito fotoeléctrico*.

Imaginemos uma muralha ao longo da costa marítima. Uma onda vai de encontro à muralha, arranca uma parte da sua superfície e recua; aproxima-se uma nova onda. A massa da muralha diminui e podemos perguntar que porção de muralha será arrancada, por exemplo, num ano. Mudemos de imagem e suponhamos que alguém alveja a muralha e que caem pedaços da mesma quando uma bala acerta nela. A massa da muralha diminui uma vez mais, e podemos muito bem admitir que, por exemplo, num ano esta diminuição da massa pelo bombardeamento ou pelo embater das ondas é igual. No entanto, pelo aspecto da muralha, podemos determinar fàcilmente qual dos dois processos fez diminuir a massa da muralha: se as ondas do mar, se as balas. Será bom conservar na memória estas diferentes imagens ao discutirmos o efeito fotoeléctrico.

O efeito fotoeléctrico pode ser descrito tanto na linguagem da teoria ondulatória como na linguagem dos fotões. Qual é a mais conveniente? Qual delas nos leva a resultados concordantes com a experiência? Vamos examinar ambas e depois veremos. Comecemos pela linguagem das ondas.

Uma onda luminosa com determinado comprimento de onda — por exemplo, a luz ultravioleta — incide sobre uma superfície metálica. A experiência ensina-nos que electrões, isto é, *quanta* elementares da electricidade (e ao mesmo tempo as unidades essenciais de que é feita a matéria) são arrancados da placa metálica; a energia da radiação é em parte transformada em energia do movimento dos electrões que foram expulsos. É este o efeito fotoeléctrico: as ondas luminosas expulsam os electrões de uma chapa metálica.

Imaginemos um físico que não conhece a teoria quântica de Planck nem a teoria fotónica de Einstein,

mas conhece a teoria ondulatória da luz. Façamos-lhe algumas perguntas:

Pergunta: «Pensas que todos os electrões têm a mesma energia, isto é, a mesma velocidade ao abandonarem a chapa metálica?».

Resposta: «Não sei, mas não vejo porque deva ser assim. Sei apenas que a energia dos electrões expulsos não deve exceder a energia da radiação incidente. Sei isto porque acredito na lei da conservação da energia».

Pergunta: «Que acontecerá quando eu emitir mais radiação, quando aumentar a intensidade das ondas incidentes? Modificar-se-á a velocidade dos electrões expulsos?».

Resposta: «É muito possível. Se incidir mais energia, pode da mesma forma sair mais energia. Ou será expulso maior número de electrões ou aumentará a sua velocidade».

Pergunta: «Observar-se-á o efeito fotoeléctrico se se usar uma luz violeta em vez da ultravioleta?».

Resposta: «Creio que sim. E porque não? Se incide a mesma energia, deve necessàriamente sair a mesma energia de uma ou de outra forma».

Vemos que as respostas são vagas, obscuras e, como verificaremos mais adiante, falsas. Modifiquemos agora o quadro. A teoria fotónica de Einstein será agora o nosso guia e faremos outra vez as mesmas perguntas.

Pergunta: «Pensas que todos os electrões têm a mesma energia, isto é, a mesma velocidade, ao abandonarem a placa metálica?».

Resposta: «Evidentemente. Bombardeamos a placa metálica com balas idênticas; um tiro certeiro expele

um electrão e transforma a energia de uma bala fotónica na energia de movimento de uma bala electrónica. Como todas as balas fotónicas têm a mesma energia, de igual modo todas as balas electrónicas devem ter a mesma energia e, por conseguinte, a mesma velocidade».

Pergunta: «Que acontecerá quando eu emitir mais radiação, quando aumentar a velocidade das ondas incidentes? Modificar-se-á a velocidade dos electrões expulsos?».

Resposta: «Aumentarás o número de tiros certeiros; portanto, aparecerá maior número de electrões, mas cada um deles terá a mesma energia, ou seja, a mesma velocidade».

Pergunta: «Aparecerá o efeito fotoeléctrico se eu usar a luz violeta em vez da ultravioleta?».

Resposta: «Isso significa que agora a placa metálica será bombardeada com balas mais pequenas. Igualmente, cada tiro arrancará um electrão, mas cada um desses electrões terá energia menor, porque o fotão que foi disparado tem menor energia. Se, pelo contrário, a luz ultravioleta for substituída por raios X, cada electrão terá uma maior velocidade».

Verificamos, pois, que, de acordo com a teoria corpuscular de Einstein, todas estas perguntas têm respostas mais precisas. Que diz a experiência? Confirmou todas as respostas duma maneira extraordinária. A teoria fotónica de Einstein integrou-se no edifício da ciência.

A experiência não só confirmou a teoria de Einstein, mas permitiu também a medição exacta da constante de Planck, tão importante para a teoria quântica. Isto foi feito em 1915, dez anos depois do aparecimento do estudo de Einstein. Levar a cabo tal

medição não é tarefa fácil, mas a explicação das ideias básicas que o permitiram é simples. De acordo com a teoria de Einstein, a energia dos electrões expulsos é igual à energia dos fotões. A energia dos electrões e, portanto, a energia dos fotões podem ser medidas. Mas a energia dos fotões é igual à constante de Planck multiplicada pela velocidade da luz e dividida pelo comprimento de onda. O comprimento de onda pode ser medido pelo fenómeno da difracção, de forma que a constante de Planck fica sendo a única incógnita. Desta forma, Millikan determinou esta constante e recebeu, por esse seu belo trabalho, o Prémio Nobel, dois anos depois de Einstein o ter recebido pela teoria do efeito fotoeléctrico.

A história das contribuições de Einstein para a teoria dos *quanta* não está isenta de acontecimentos irónicos. Einstein, no seu trabalho sobre a teoria da relatividade, é fortemente influenciado pela teoria do campo, mais concretamente, pela teoria do campo de Maxwell, que governa os fenómenos ópticos e electromagnéticos. Ele acreditava que a teoria do campo é talvez a maior descoberta científica do homem. Einstein disse-me mais de uma vez que apreciava mais a teoria de Maxwell do que a sua. Tenho a certeza que a história considerará o autojulgamento de Einstein como demasiado modesto. Parece estranho que, por um lado, ele admirasse a teoria do campo e construísse sobre ela o seu pensamento sobre a teoria da relatividade e, por outro lado, tivesse feito tudo quanto pôde para destruir esta teoria do campo com a sua teoria do efeito fotoeléctrico. Mas chegar a semelhante conclusão seria pior do que uma excessiva simplificação — seria, francamente, uma falsificação.

Eis os principais marcos miliares da teoria da luz:

1. As teorias ondulatória e corpuscular da luz (Huyghens e Newton).
2. O fenómeno da difracção e a vitória da teoria ondulatória (Fresnel, Young).
3. A teoria electromagnética da luz (Maxwell).
4. A teoria quântica da radiação (Einstein).

Pode a física moderna rejeitar a teoria ondulatória e admitir só a teoria quântica das radiações? Evìdentemente que não. Poderíamos então explicar o efeito fotoeléctrico, mas não a difracção. Não poderíamos explicar o aparecimento de imagens alternadamente claras e escuras quando a luz penetra por uma pequena abertura ou se difracta perante pequenos obstáculos. Estamos perante uma situação crítica. Temos duas teorias — a das ondas e a dos fotões — que explicam, cada uma delas, determinados fenómenos. A da difracção da luz parece contradizer a teoria fotónica. O efeito fotoeléctrico parece contradizer a teoria ondulatória. Qual é a saída para este dilema? O que é afinal a luz? É uma chuva de fotões ou é composta de ondas no éter?

Eis perguntas novas e profundas. Foram elas provocadas pela grande descoberta de Einstein e levaram directamente ao centro da teoria quântica, ao problema da sua natureza estatística, à questão do determinismo ou indeterminismo. Tem sido publicada uma extensa bibliografia sobre estes problemas, de significado tanto científico como filosófico. Foram expostas várias opiniões. Porém, o seu esclarecimento só é possível se penetrarmos profundamente em toda a estrutura do conceito da teoria quântica.

Estamos tentados a afirmar que a luz tanto pode ser uma onda como uma emissão de fotões. Mas a pergunta «que é afinal a luz?» não tem sentido. O seu sentido aparente baseava-se na crença, agora abalada, de que existe apenas uma representação única, uma só teoria a esclarecer todos os fenómenos. Temos que aplicar provisòriamente, pelo menos na actualidade, duas imagens: a corpuscular e a ondulatória.

Não há qualquer razão para nos perturbarmos ou cair no misticismo. Podemos imaginar também na vida diária uma situação em que existam duas teorias para explicar uma mesma «realidade».

Imaginemos um homem que se torna, alternadamente, completamente cego e completamente surdo, mas nunca ambas as coisas ao mesmo tempo. Vai regularmente ao cinema. Quando está surdo, vê filmes mudos, quando ouve, mas é cego, julga que está ouvindo discos. Ele pode explicar com êxito o mundo das suas impressões sensoriais por meio de dois mecanismos totalmente diferentes, que talvez possa, um dia, reunir num único. Então verificará que a razão destas duas impressões diferentes reside nas suas próprias limitações, no facto de dispor para sua orientação sòmente de um dos dois sentidos, a vista ou o ouvido.

A descoberta de Einstein influenciou o desenvolvimento posterior da teoria quântica. Na representação do átomo, segundo Bohr, um electrão salta de um estado para outro e em cada salto *emite um fotão*. Esta ideia, que utiliza a teoria dos fotões de Einstein, juntamente com outras ideias completamente novas e importantíssimas, está na base da teoria quântica. Mais tarde os trabalhos de De Broglie foram inspirados e influenciados pelos de Einstein. Se a luz

revela os seus aspectos corpuscular e ondulatório, não se passará o mesmo com uma emissão de electrões? Neste caso conhecemos o aspecto corpuscular, mas se seguimos o raciocínio de Einstein, temos que procurar fenómenos em que a matéria revele o seu aspecto ondulatório. Esta ideia levou à predição e descoberta da difracção das ondas materiais. Não só o trabalho de De Broglie foi inspirado pelo de Einstein, mas, mais ainda, Einstein foi o primeiro a reconhecer a importância e a novidade das ideias de De Broglie. O trabalho de Schroedinger está ligado lògicamente ao de De Broglie, como a expressão «mecânica ondulatória» indica. Mas o trabalho de Schroedinger apenas se ajusta ao quadro da mecânica clássica. De acordo com a teoria da relatividade restrita, todas as leis físicas devem ajustar-se a qualquer sistema de inércia e todos esses sistemas de inércia estão ligados entre si pela transformação de Lorentz. Empregando linguagem técnica, diremos que as leis da física devem ser invariantes, não em relação à transformação de Galileu, mas em relação à de Lorentz. Contudo, a mecânica ondulatória de Schroedinger não era invariante em relação à transformação de Lorentz. Um conhecimento mais profundo foi conseguido por Dirac, que reconciliou as teorias quântica e da relatividade, conseguindo ao mesmo tempo uma mais perfeita concordância entre a teoria e a experiência. A sua teoria conduziu à descoberta de uma nova porção da matéria: o positrão, com uma massa igual à massa do electrão e com uma carga de sinal contrário. O positrão é o filho legítimo que nasceu do casamento entre as teorias quântica e da relatividade.

Ao escrever estas linhas, eu próprio fico admirado com a grande influência exercida pela obra de Einstein na teoria quântica. As origens dessa influên-

cia são, por um lado, a teoria corpuscular da luz de Einstein e, por outro lado, a sua teoria da relatividade. E, no entanto, deixamos de parte muitas contribuições de Einstein para a teoria quântica, como seja a estatística de Einstein-Bose, a teoria quântica do calor específico, etc. Quem acompanhar o desenvolvimento actual da teoria quântica sabe que esta influência está longe de se ter esgotado. Aumenta cada vez mais.

Do ponto de vista de Einstein, com efeito, os limites alcançados foram transpostos por muitos físicos especializados em teoria quântica. Para compreendermos bem a atitude de Einstein temos que estudar atentamente a sua obra e as suas tendências científicas. Se olharmos para a obra de Einstein, veremos nela o esforço para construir, com poucas bases, uma teoria geral. Isto é evidente nas teorias da relatividade restrita e especializada, em que a construção lógica é simples e as suposições podem ser manifestadas duma maneira clara e explícita. Elaboradas estas ideias, pouco havia nelas para ser modificado. As obras de Einstein sobre a relatividade ainda não envelheceram.

Quanto à teoria quântica, a situação é outra. Aqui conhecemos um grande número de factos. A física experimental tomou actualmente a dianteira à teoria. Especialmente no campo dos fenómenos nucleares, não temos uma teoria única, mas antes uma série de muitas interpretações, por vezes contraditórias. Procuramos ainda uma interpretação teórica geral, com a qual todos os fenómenos conhecidos possam estar de acordo. Não devemos intimidar-nos com o facto de, numa dada altura, enunciarmos princípios novos e formularmos teorias que morrerão mais depressa do que flores. Einstein acredita que o moderno desenvolvimento da teoria quântica é apenas tempo-

rário e será substituído por uma teoria construída segundo linhas diferentes; ele considera a grande revolução como inacabada.

Perguntei uma vez a Einstein: «Porque está tão descontente com a teoria quântica, principalmente com o desenvolvimento que se originou a partir dos seus próprios trabalhos?». Einstein respondeu: «Sim, talvez que eu a tivesse começado, mas sempre considerei como temporárias as ideias que enunciei. Nunca pensei que outros as tomassem muito mais a sério do que eu próprio».

A Einstein desagradou o carácter estatístico da teoria quântica, a suposição de que a teoria dos *quanta* trata de leis relativas a grandes números, e não a indivíduos. Muitos físicos consideram essencial este carácter estatístico da teoria quântica moderna e pensam ser muito improvável que no futuro isto se modifique. De qualquer maneira, nenhum físico duvidará de que daqui a muitos anos nenhum historiador científico encontrará qualquer dificuldade em reconhecer a marca do génio de Einstein no dramático desenvolvimento da teoria quântica.

CAPÍTULO VI

Para além das revoluções?

Em busca da unidade

Acabámos de ver como a teoria da relatividade, essencialmente a obra de um homem, modificou as nossas noções de espaço, tempo, massa, energia e gravitação e da geometria do universo. A teoria dos *quanta,* pelo contrário, é obra de muitos homens, no meio dos quais Einstein é um dos mais notáveis; as suas contribuições, principalmente a sua teoria dos fotões, não foram ultrapassadas com o andar do tempo.

Tentei explicar em palavras simples algumas das ideias de Einstein: aquelas que podiam ser explicadas de forma simples e as que influenciaram, mais do que quaisquer outras, a ciência contemporânea. Talvez alguém se admire de que só raramente tivéssemos mencionado a obra de Einstein posterior a 1921. Todos os pensamentos de Einstein sobre as teorias da relatividade e dos *quanta* foram fruto dos anos anteriores. Evidentemente, Einstein trabalhou durante toda a vida, meditando e escrevendo trabalhos científicos. Pensou sempre, sem interrupção, em problemas da física.

Se examinarmos a influência da obra de Einstein no pensamento moderno, verificaremos a grandeza dessa influência. Mas se examinarmos toda a actividade de Einstein e toda a sua produção científica, acharemos, com surpresa, que apenas uma pequena parte desse trabalho influenciou o desenvolvimento da ciência.

Quantos trabalhos escreveu Einstein: estudos engenhosos, que são o resultado de trabalho, pensamento, trabalho e mais trabalho! No entanto, alguns deles são considerados hoje antiquados, errados ou artificiais. Ao discutir este problema com Einstein, ele afirmou: «Um homem tem possibilidades limitadas».

Na verdade, Einstein, nos seus últimos trinta anos, empreendeu repetidamente o estudo de problemas profundos e difíceis, elaborou teorias, reconstruiu-as de novo, desprezou-as e de novo as recomeçou. Por vezes estava satisfeito com o seu trabalho, mas de novo o abandonava se não tivesse atingido o seu padrão elevado de simplicidade lógica e de beleza. A sua tenacidade em atacar um problema durante anos, em se preocupar contìnuamente com ele, é a característica essencial do génio de Einstein.

De 1918 a 1950 Einstein trabalhou num dos problemas mais fundamentais e difíceis da ciência: achar uma teoria que abarcasse, não só os fenómenos do mundo dos infinitamente grandes (como sucedia com a sua velha teoria da gravitação), como também os fenómenos infinitamente pequenos relacionados com os constituintes do átomo. Muitos cientistas acreditavam, e continuam a acreditar, que um projecto tão ambicioso nunca poderá ser realizado, pois que as leis válidas para os sóis e para as nebulosas são diferentes das válidas para os electrões do átomo, e jamais será possível conseguir um princípio uniforme que abranja ambos os casos.

Einstein completou 70 anos em 1949. Acreditava ter achado nesse ano a solução para que trabalhara durante mais de trinta. O resultado deste passo decisivo foi publicado na edição revista do livro *O Significado da Relatividade* [1].

Teria Einstein resolvido o difícil problema de encontrar uma lei comum para os fenómenos dos infinitamente grandes e dos infinitamente pequenos? É de supor que a dúvida continuará até que a análise matemática e a observação pronunciem a sua sentença — até que encontremos os tesouros ocultos nas novas equações de Einstein. Por isso, ninguém ainda sabe se uma nova revolução teve lugar no campo da ciência.

Para podermos compreender, pelo menos nas suas linhas gerais, o problema sobre o qual Einstein trabalhou durante quase trinta anos temos de voltar de novo ao século XIX, ao tempo de James Clerk Maxwell, o primeiro a elaborar com êxito uma teoria do campo. Lembremo-nos de que as ondas hertzianas e ópticas são governadas pelas mesmas leis, formuladas nas equações de Maxwell. Elas dizem-nos como o campo electromagnético varia no espaço e no tempo, como as ondas electromagnéticas se propagam e quais as suas propriedades físicas. A teoria de Maxwell é uma teoria do campo porque toma em consideração as variações no tempo e no espaço tridimensional. É completamente diferente de uma teoria mecânica que se ocupe de problemas tais como o movimento da Lua em volta da Terra. Numa teoria mecânica os corpos e o seu movimento são importantes e numa teoria do

---

[1] *The Meaning of Relativity*, Princeton University Press, 1950.

campo é importante a variação de um campo no espaço e no tempo.

Assim, ao descrevermos, no século XIX e começo do século XX, os fenómenos electromagnéticos, não empregámos apenas os conceitos de campo. Os electrões, isto é, partículas negativas carregadas, geram um campo electromagnético quando em movimento. Achamos, deste modo, na teoria de Maxwell e, mais tarde, na de Lorentz uma mistura de aspectos de campo e de partículas. As partículas (electrões) movem-se num campo electromagnético e influenciam-no com o seu movimento. Deste modo, o ponto de vista de campo é a característica nova e predominante na teoria de Maxwell. O campo electromagnético é caracterizado, em cada ponto do espaço, por duas setas ou vectores. Uma delas indica o campo eléctrico e a outra o magnético. Mas uma seta poderá ser descrita pelas suas três projecções num sistema de três eixos ortogonais. (Uma seta num plano é caracterizada por duas projecções, e por três num espaço tridimensional). Portanto, o campo será representado em cada ponto (não nos esqueçamos de que existem duas setas!) por seis números, três designando o campo magnético e três o campo eléctrico. Estes números variam de lugar para lugar. As duas setas, e, portanto, os seis algarismos, variam num mesmo ponto de instante para instante. A equação de Maxwell dá-nos a lei que rege esta variação. Ou ainda: o campo electromagnético é caracterizado por seis funções de espaço e tempo. As equações de Maxwell indicam-nos como variam essas funções no espaço e no tempo.

Lembremo-nos também de que a teoria da relatividade generalizada de Einstein realiza para os fenómenos da gravitação o mesmo que a teoria de Maxwell para os fenómenos electromagnéticos. Na teoria de

Einstein o campo de gravitação é caracterizado por dez funções, que variam no espaço e no tempo. Elas desempenham um papel semelhante ao das seis funções da teoria de Maxwell. As equações da gravitação de Einstein indicam-nos a maneira como estas funções variam no espaço e no tempo.

Na teoria electromagnética existe uma mistura de princípios de campo e de partículas. O campo será produzido pelos electrões e seu movimento. Similarmente, o campo de gravitação, na teoria primitiva de Einstein, será produzido pelos corpos (estrelas e nebulosas) e seu movimento. Temos assim, por comparação das teorias de Maxwell e de Einstein, as seguintes analogias:

campo electromagnético — campo de gravitação
partículas electrizadas — massas gravitacionais
movimento de partículas electrizadas — movimento de massas gravitacionais

A nossa analogia é incompleta e mesmo, sob certos aspectos, um pouco enganadora. Temos agora de mencionar uma característica das equações do campo de Einstein. O campo de gravitação é influenciado não só pelas massas gravitacionais em movimento, mas também pelo próprio campo electromagnético. Portanto, as origens de um campo de gravitação residem nas massas em movimento, nas partículas electrizadas em movimento e no campo electromagnético. Um campo de gravitação verdadeiro pode existir sem um campo electromagnético, mas um campo electromagnético verdadeiro não pode existir sem um campo de gravitação.

Consideremos agora o ponto de vista de 1920, quando a estrutura da teoria da relatividade foi

completada. Sem esta teoria não nos é possível compreender os acontecimentos futuros. Verificamos existir uma diferença essencial entre o campo de gravitação e o campo electromagnético. O campo de gravitação é um campo geométrico e o electromagnético é um campo físico.

O considerar-se o campo de gravitação como um campo geométrico é o resultado de um dos maiores e mais revolucionários pensamentos que jamais apareceram na física; as dez funções que caracterizam a geometria do nosso mundo quadridimensional são as mesmas dez funções que caracterizam o campo de gravitação. Um mundo sem massas, sem electrões, sem um campo electromagnético é um mundo vazio, é um plano. Mas se surge a massa, se surgem as partículas electrizadas, se surge o campo electromagnético, então surge também um campo de gravitação. Se surge o campo de gravitação, então o nosso mundo torna-se curvo. A sua geometria é a de Riemann, e não a de Euclides.

Assim, as mesmas dez funções caracterizam o campo métrico e o campo gravitacional. O termo «métrico» indica a ligação entre estas dez funções e a geometria do nosso mundo. O termo «gravitacional» indica que estas mesmas dez funções descrevem os fenómenos de gravitação no nosso mundo. O facto de podermos empregar qualquer destes termos ou ambos indica que o campo de gravitação físico tem o seu correspondente geométrico. O que respeita ao campo de gravitação reflecte-se de novo na física como geométrico. A geometria do nosso mundo e o campo de gravitação formam-se por meio de massas em movimento, por cargas eléctricas e pelo campo electromagnético. Assim, a ligação *física — geometria* existe apenas para o campo de gravitação.

Hermann Weyl, um dos maiores matemáticos contemporâneos, considerava artificial esta diferença entre campo de gravitação e campo electromagnético. A teoria da relatividade generalizada trata estes dois campos de uma maneira totalmente diferente. O campo de gravitação é também um campo geométrico. Existe, por assim dizer, um aspecto físico e um aspecto geométrico do campo de gravitação, mas existe apenas um aspecto físico para o campo electromagnético. Deste modo, a teoria da relatividade generalizada apresentou uma notável combinação da geometria com a física. Para podermos compreender os esforços posteriores de Einstein temos primeiramente de compreender a razão por que ele se encontrava descontente com a teoria do campo, como ela era então conhecida. Temos na equação de Maxwell:

conhecido: cargas eléctricas e seu movimento
desconhecido: o campo electromagnético

Na teoria da relatividade de Einstein temos:

conhecido: massas gravitacionais e seu movimento
desconhecido: o campo de gravitação ou campo métrico

Na teoria da relatividade os valores conhecidos e desconhecidos formam uma estranha combinação. A massa e a energia não têm qualquer correspondente geométrico. Mas o campo tem!

Aus der vorliegenden Untersuchung ist klar ersichtlich, dass für die Determination des Bewegungsgesetzes der Gravitationsfelder Massen durch das Feldgesetz des Gravitationsfeldes zwei Umstände wesentlich sind:

1) die Nicht-Linearität der Feldgleichungen

2) der Überbestimmtheit der Feldgleichungen.

Zu Punkt 2) ist zu bemerken: es existieren 10 Gleichungen für die 6 Gravitationspotentiale $g_{\mu\nu}$ (wir sprechen hier nur von 6 Gravitationspotentialen, weil von den 10 Gravitationspotentialen wegen der freien Koordinatenwahl in allgemein relativistischen Feldtheorien vier ohne Beschränkung der Allgemeinheit willkürlich festgesetzt werden können, sodass im Ganzen nur 6 Komponenten für die Beschreibung des metrischen Feldes massgebend sind).

Fac símile dum original manuscrito de Einstein

Os dois pecados

A teoria da relatividade generalizada nasceu do descontentamento de Einstein com a teoria clássica da gravitação. A nova teoria nasceu do seu descontentamento com a teoria da relatividade generalizada. O seu ponto fraco era a combinação artificial dos conceitos geométrico e físico. Mas não era este o seu único ponto fraco. Há outro talvez ainda mais importante.

Tanto a teoria electromagnética como a da gravitação são teorias dualistas. Em ambas temos a origem do campo (cargas eléctricas, corpos) e o campo em si. Verificamos, pois, em ambas as teorias uma combinação de dois conceitos: matéria e campo. Seria filosòficamente muito mais satisfatório podermos construir uma teoria unitária baseada apenas num destes conceitos. Os triunfos da teoria do campo foram tão grandes que se pôde abandonar o conceito de campo. O objectivo de Einstein era construir uma teoria do campo pura. Em tal teoria teríamos apenas conceitos e equações do campo. Mas podíamos perguntar: como podemos estar satisfeitos simplesmente com equações do campo? Sabemos que a matéria é tão real como a pedra onde tropeçamos. Os partidários da teoria unitária diriam que a existência do que é conhecido como matéria seria apenas deduzida das equações de campo. O que consideramos como matéria está situado na região em que o campo é particularmente forte. O movimento da matéria significa que a região em que o campo é particularmente forte varia com o tempo. Por isso um electrão em repouso será representado numa teoria unitária electromagnética por uma pequena região dentro da qual o campo é muito forte e fora da qual é ràpidamente anulado.

Semelhante região com um campo forte mas finito representa energia concentrada, isto é, matéria.

A matéria é, desta maneira, descrita e explicada por uma boa teoria do campo com a ajuda de campos fortes. Do ponto de vista da simplicidade lógica, um grande passo poderia ser dado se tanto a teoria de Maxwell como a teoria da relatividade generalizada pudessem ser reduzidas a uma teoria do campo pura. Semelhante teoria ocupar-se-ia apenas com o conceito do campo electromagnético, caracterizado por seis funções, e com o do campo de gravitação, caracterizado por dez funções. Mas as leis destes campos deviam ser modificadas. Diferentemente do que aconteceu com a teoria de Maxwell e com a da relatividade generalizada, estas novas teorias devem admitir soluções que representem a matéria. Tal não acontecia com as teorias antigas.

Mas, mesmo que conseguíssemos formular uma teoria do campo pura, semelhante teoria seria ainda maculada por um outro pecado. Vimos nas antigas teorias que o campo de gravitação era também um campo geométrico, enquanto o campo electromagnético era um campo puramente físico. Esta separação é uma vez mais artificial, e, segundo Einstein, uma teoria satisfatória deveria ter as seguintes características:

1. Ser uma teoria do campo pura.
2. Tratar os campos electromagnético e de gravitação na mesma base, isto é, ambos deveriam descrever a geometria do nosso universo.

Einstein procurava assim fazer desaparecer o pecado do duplo dualismo das nossas teorias. Ele acreditava que a busca de uma geometria simples do nosso universo, mas mais geral do que a da geometria

de Riemann, nos levaria a equações puras do campo que descrevessem os fenómenos electromagnéticos e de gravitação. E mais ainda: se semelhante teoria constituísse um êxito, mostrar-nos-ia simultâneamente as propriedades das partículas elementares do átomo e explicaria o movimento dos planetas, das estrelas e das nebulosas.

No fim da busca?

Einstein pensava ter encontrado solução para este grande problema. Na verdade, a sua nova teoria é uma teoria perfeitamente unitária. Nela só aparece o campo; não se refere a qualquer origem do campo. A existência da matéria terá de ser deduzida das equações do campo encontrando soluções que representem a grande concentração do campo. A nova teoria é uma teoria geométrica pura. Enquanto o campo electromagnético é caracterizado, na teoria de Maxwell, por seis funções e o campo de gravitação, na antiga teoria de Einstein, é caracterizado por dez funções, o campo métrico da nova teoria é caracterizado por dezasseis funções $(10 + 6)$. Em linguagem técnica será: o campo electromagnético é caracterizado por um tensor anti-simétrico com seis componentes, o campo de gravitação por um tensor anti-simétrico com dez componentes e a geometria do novo mundo de Einstein por um tensor geral de segunda ordem com dezasseis $(6 + 10)$ componentes.

Na teoria da relatividade generalizada as equações do campo de Einstein caracterizam a geometria riemanniana do nosso mundo. Mas, de acordo com a nova teoria de Einstein, a geometria do nosso mundo é não-riemanniana; as novas equações do campo de Einstein definem essa nova teoria não-riemanniana do nosso mundo. Para cada princípio que aparece

na nova teoria existe uma representação geométrica. A diferença entre princípios puramente físicos e os de interpretação geométrica está ultrapassada. A diferença entre matéria e campo desapareceu também. Passa a existir apenas o campo, que é não só geométrico, mas também físico. Só existem as equações do campo que definem a geometria do nosso mundo e as leis da física.

Para campos fracos conseguimos uma vez mais, com essa nova teoria, as leis das antigas teorias, ou seja, as equações de Maxwell e as da gravitação. E isto tem de ser assim porque todas as teorias novas devem explicar também os fenómenos que a antiga teoria esclarecia. Como sempre acontece, também aqui a teoria rejeitada aparece como uma primeira aproximação da nova teoria.

Apesar de a nova teoria de Einstein possuir muitas características sedutoras, ainda não sabemos se ela é uma teoria do campo assente; não sabemos se contém soluções que possam ser interpretadas como partículas elementares. Sabemos que as antigas teorias de Maxwell e de Einstein não davam qualquer solução das equações do campo que pudessem ser consideradas como partículas. Segundo as antigas teorias, a existência da matéria tinha de ser considerada como independente do campo. Conseguirá a nova teoria aquilo que a antiga não conseguiu? Eis uma questão decisiva, à qual ainda não é possível responder.

O problema, porém, é ainda mais complicado. O desenvolvimento da física diz respeito às leis quânticas, válidas dentro do átomo. Não está esclarecido se e de que maneira semelhantes leis podem ser deduzidas da teoria do campo de Einstein. No entanto, não devemos ser demasiadamente cépticos. A obra de Einstein encontrou sempre um cepticismo passageiro, pois o seu génio estava em avanço relati-

vamente à época em que viveu. Isto aconteceu duas vezes, e pode ter acontecido outra vez no começo desta segunda metade do século XX.

Einstein, o homem e o filósofo

Einstein é considerado não só um grande físico, mas também um filósofo famoso. A transformação radical que a teoria da relatividade trouxe em relação aos princípios de tempo, espaço e geometria, especialmente com a substituição de especulações vãs pela apresentação de questões claras da física, permanecerá como um marco visível no caminho do conhecimento humano. Apesar disso, a filosofia de Einstein não fica esgotada.

Há alguns anos já ouvi em Praga uma conferência do Prof. Sommerfeld, numa reunião da Sociedade de Física. A uma enorme assistência contou ele o seguinte: «Perguntei a Einstein, que considero o maior filósofo vivo, se haverá um mundo real fora de nós, e Einstein respondeu: Sim, creio que sim».

Einstein pensava que a física não pode ser impulsionada sem a ideia da existência real de um mundo exterior. Ele exprimiu de várias maneiras a sua oposição tanto ao idealismo filosófico, que se arreigou na frase de Berkeley «esse est percepi» (ser é perceber), como aos fenomenologistas, positivistas e empirio-criticistas que se seguiram. No seu trabalho «Physik und Realitat», publicado em Paris, em 1939, no *Zeitschrift für freie deutsche Forschung*, exprimiu a sua opinião sobre o assunto da seguinte maneira:

> ... Para ela [a física fenomenológica] é característico o servir-se de noções o mais próximas possível da experiência, mas renunciando largamente, em contra-

partida, à uniformidade dos fundamentos. Calor, electricidade e luz são definidos por meio de variáveis especiais do estado e de constantes materiais, além do estado mecânico na sua permanência recíproca e temporal, era um problema solúvel apenas de uma forma empírica. Muitos contemporâneos de Maxwell viam nesta forma de apresentação o objectivo final da física, que eles consideravam, em virtude da relativa proximidade da experiência vivida das noções empregadas, puramente indutiva e deduzível das vivências. St. Mill e E. Mach defendiam teorias de conhecimento com, sensìvelmente, este ponto de vista.

Em minha opinião, é esta a maior contribuição da mecânica newtoniana: que o seu uso tivesse trazido a vitória deste ponto de vista (fenomenológico): e isto no campo dos fenómenos do calor. Tal facto aconteceu através da teoria cinética do gás e, principalmente, através da mecânica estática. Em primeiro lugar, uniu as equações da situação dos gases, dos fenómenos radiométricos dos gases, e forneceu a ligação lógica dos fenómenos que, experimentalmente, se não encontravam relacionados entre si. Deu ainda um significado mecânico aos princípios e leis termodinâmicos e o conhecimento dos limites existentes no uso dos princípios e leis do ensino clássico do calor. Esta teoria cinética, que ia muito além da fenomenológica, relacionada com a unidade lógica das bases, fornecia também valores específicos para o tamanho real dos átomos e moléculas, valores esses que resultavam de métodos independentes entre si; por isso ficaram acima de qualquer dúvida. Este passo decisivo era assim corrompido, pois que aos pontos materiais eram acrescentados produtos reais (átomos ou moléculas) cujo carácter construtivo-speculativo era evidente; ninguém podia esperar «ver imediatamente» um átomo. Porém, foram deduzidas dos conceitos fundamentais, por meio de cálculos complicados, leis sobre quantidades observáveis, tais como temperatura, pressão, velocidade. Deste modo, esta física (ou, pelo menos, parte dela), originalmente mais fenomenológica, foi reconduzida, com o auxílio da mecânica newtoniana, para o átomo (e para as moléculas), de uma base mais afastada da experiência, ainda que mais simples.

Esta atitude fundamental levou Einstein a rejeitar a opinião de que por meio da relação não-rigorosa de Heisenberg talvez se conseguisse pôr um limite ao conhecimento humano e de que a teoria quântica pode fornecer uma descrição «definitiva» ou mesmo «completa» dos acontecimentos naturais.

No sistema de conceitos da teoria dos *quanta* entram, em princípio, apenas grandezas que possam ser determinadas pelos sistemas métricos hoje existentes, tais como carga, massa, energia, momento genético das moléculas. É, deste modo, uma teoria puramente fenomenológica. Esta teoria não dá nem pode dar qualquer informação a respeito da estrutura molecular — ou seja, por exemplo, os inúmeros corpúsculos existentes numa carga eléctrica, a maneira como estas cargas estão repartidas na molécula, a razão por que existem essas moléculas.

Nem é possível conseguir, por meio da mecânica estática clássica, um relance da estrutura interna do átomo. No tempo em que Clausius, Boltzmann e Gibbs viveram a ciência penetrou no campo da física fenomenológica, onde se situa a existência real dos átomos, embora quase não fosse possível apresentar uma única prova a respeito deles. Mais tarde houve a confirmação da estrutura molecular da matéria. E Einstein pensava que a ciência moderna penetraria, de igual forma, no campo da teoria quântica, tirando-lhe o seu carácter fenomenológico.

Einstein acentuou sempre o significado da teoria do campo pura; esteve sempre convencido de que um alargamento e uma generalização da teoria da relatividade poderiam vencer as dificuldades da teoria quântica moderna. Uma das suas últimas teorias foi uma tentativa nesse sentido. Ele estava convencido de que as suas equações levariam à solução que con-

duziria à descoberta da estrutura molecular e, por fim, local e temporal da sua história.

Por outro lado, muitos físicos consideram a teoria dos *quanta* uma teoria de carácter puramente estatístico, relacionada com generalidades, e não com indivíduos. Einstein não estava satisfeito com esta interpretação estatística da teoria dos *quanta*, embora a admitisse lògicamente correcta. Considerava a descrição da natureza, segundo a teoria quântica, incompleta e temporária. Einstein apresentava muitas vezes o seguinte exemplo: consideremos a explosão de um átomo radioactivo que possa ser observada num contador Geiger. Será possível — pelo menos teòricamente — observar as leis físicas quando e onde o mostrador do contador Geiger o indicar. Mas a definição dada pela teoria dos *quanta* — considerada por Einstein como incompleta — dá-nos apenas um indício sobre a possibilidade dessa indicação. Einstein escreveu o seguinte a este respeito:

> O problema relativo à marca indicada no contador pertence ao domínio do mundo das noções macroscópicas, em oposição ao problema respeitante ao momento da cisão de um átomo isolado. Se procurarmos interpretar este estado de coisas, em relação à teoria quântica, considerando a descrição dada pela teoria quântica como a descrição completa dum sistema único, somos forçados a pensar que a leitura no contador nada tem que ver com o sistema, mas que depende, na verdade, da indicação dada por uma observação do próprio contador. Semelhante concepção não é de modo algum absurda do ponto de vista lógico, e no entanto é inverosímil que alguém esteja disposto a tomá-la em consideração. No mundo macroscópico temos de nos restringir a um programa de definição realística no espaço e no tempo; no domínio dos conhecimentos microscópicos estamos mais dispostos a desconsiderar, ou, pelo menos, a modificar, este programa («Expectations of a Definite Form», in *Physics today*, Fevereiro de 1950).

E noutro lugar do mesmo artigo:

> O que eu não posso suportar neste género de argumentação (o teórico quântico, compreendendo a teoria dos *quanta* como uma descrição completa dos acontecimentos elementares) é a atitude básica, positiva, que, segundo o meu parecer, é inconsistente e constitui, na essência, o princípio de Berkeley: «esse est percepi».

Einstein é considerado de vez em quando, e não obstante esta afirmação clara, um «filósofo idealista». Porém, a sua fé na realidade do mundo que nos rodeia está sempre presente nos seus escritos.

Einstein acreditava na capacidade do espírito humano para conhecer bem a natureza, e não apenas para ter um vago conhecimento dela. Era o que ele queria dizer quando afirmava, a esse respeito, que «a física é um sistema lógico de pensamento, ainda em pleno desenvolvimento, cujos fundamentos não são extraídos dos resultados por meio de um método indutivo, mas apenas podem ser conseguidos por meio de descobertas livres. O valor da verdade do sistema está na verificação de sentenças contínuas de experiências sensíveis, pela qual a referência da última para a primeira é apenas compreensível intuitivamente. O desenvolvimento executa-se no sentido da simplicidade crescente, dos fundamentos lógicos. Para podermos chegar a este alvo temos de nos contentar com a ideia de que as atitudes básicas fundamentais estão cada vez mais afastadas dos acontecimentos e o caminho do pensamento, desde esses conceitos-bases até cada fase seguinte, fase essa que encontra um correlativo em experiências sensíveis, se torna cada vez mais longo e mais difícil».

O maior argumento contra a ideia de que o ensino de Einstein é uma filosofia idealista encontra-se na sua crença de que as noções físicas, tais

como «ponto material», «corpos rígidos», etc., devem ser descobertas livres do espírito humano. Mas por «livre» entendia Einstein, não o conceito de que a liberdade se encontra na acção livre da vontade, mas o conceito duma abstracção tirada da experiência, em direcção a um alvo, baseando o conhecimento nessa experiência. Ele provou, na verdade, que, no decurso do desenvolvimento da ciência, conceitos diversos têm sido usados na descrição do mundo que nos rodeia. Um exemplo típico da mudança dos conceitos físicos é a passagem do conceito de pontos materiais simples para o conceito do campo. Embora o fim do nosso conhecimento seja a descrição do mundo que nos rodeia, temos de reconhecer que muitas vezes, nos nossos esforços, nos é necessário rever os nossos conceitos primitivos. O alvo final, porém, é a verdade objectiva a respeito desse mundo que nos rodeia. Einstein acreditava que não há limites fundamentais para o conhecimento e que cada vez compreenderemos mais completamente a experiência. Isso é, aliás, demonstrado pela história da ciência. Na história da ciência podem observar-se períodos de progressos revolucionários, quando, dum só golpe, grande número de problemas são resolvidos, alternando com períodos de desenvolvimento aparentemente mais lento, no fim dos quais surge de novo um certo número de problemas insolúveis; novas revoluções se dão então. Deste modo, não existem reveses, mas sim, e sempre, um progresso na obtenção de um maior conhecimento das relações naturais. Segundo parece, este progresso do nosso conhecimento será caracterizado, no futuro, por esta alternação de épocas evolucionárias e épocas revolucionárias. A única inconsequência que existe é que é assim mesmo; para dizer como Einstein, «a eterna incompreensão do mundo é a sua compreensão».

Einstein influenciou o mundo contemporâneo com as suas doutrinas, os seus pensamentos e os seus escritos. Não nasceu para ser um homem de acção: no entanto, duvido que tenha existido alguma vez, na história da ciência, um outro homem que, como Einstein, tenha estimulado tanto a imaginação dos homens de todo o mundo.

O nome de Einstein é conhecido por toda a parte desde o fim da primeira guerra mundial. A confirmação da previsão de Einstein relativa à curvatura dos raios luminosos no campo de gravitação do Sol, feita pela expedição inglesa que, mais ou menos naquela altura, estudou o eclipse do Sol, provocou uma discussão mundial sobre os fundamentos da física.

Quando, em 1921, fui estudar para Berlim, assisti, admirado, ao espectáculo vergonhoso que acompanhou a fama de Einstein. Aconteceu isto doze anos antes de Hitler subir ao poder. Li nos jornais conservadores artigos de fundo atacando a teoria de Einstein: «Se ele acredita na sua teoria, deixem-no responder aos nossos argumentos. Seremos justos e imprimiremos a sua resposta». Vi cartazes anunciando conferências contra a teoria de Einstein num dos maiores teatros de concertos de Berlim. A minha curiosidade levou-me a comprar um bilhete para assistir. Havia uma dupla atracção: deviam falar dois professores. Um homem com uma pequena barriga e voz monótona leu um manuscrito a uma sala à cunha, afirmando que a teoria da relatividade restrita era ridícula com o seu paradoxo dos gémeos, que era a maior fraude na história da ciência e que toda a atenção que lhe fosse dada era contrária ao verdadeiro espírito alemão. Naquela época não era ainda conveniente atacar abertamente Einstein como judeu; no entanto, isso não foi feito apenas uma, mas muitas vezes, embora disfarçadamente. Aparentemente existia na Alemanha a

República de Veimar, mas entreviam-se já os sinais das revoluções que haviam de surgir.

Lembro-me ainda de que no intervalo das duas conferências todos olhavam para o camarote onde estava Einstein. Desconheço a razão por que ele compareceu, mas pareceu-me muito satisfeito a cumprimentar gente conhecida e a rir abertamente com gargalhadas trocistas, surpreendendo os conferencistas com a sua presença. Os acontecimentos posteriores foram extraordinários. Realizaram-se em todo o mundo conferências populares sobre a teoria da relatividade. Ganhava-se dinheiro com o assunto. Uma revista americana — não me ocorre o nome — dava um prémio de alguns milhares de dólares pelo melhor artigo que em três mil palavras explicasse a teoria da relatividade. Para estudantes que viviam num país onde reinava a inflação tal quantia excedia a imaginação. Ajudei um amigo no seu artigo e no meu modesto quarto demos os últimos retoques no trabalho. Ao contarmos as palavras sonhávamos com a chuva de ouro que a teoria da relatividade e os Estados Unidos nos proporcionariam. Mas não ganhámos o prémio.

Quando mais tarde regressei à Polónia, surpreendeu-me encontrar o mesmo ambiente. A fama da teoria da relatividade atravessara todas as fronteiras. Era objecto de discussões largas e apaixonadas. O meu professor de matemática, Zaremba, matemático distinto, fez uma conferência de nível elevado e várias de tipo popular contra a teoria da relatividade. Argumentava que a teoria da relatividade era contraditória da definição de corpos rígidos. Um corpo rígido é um corpo que não se contrai. Como pode então uma vara rígida contrair-se em movimento? Era, sem dúvida, um argumento banal, embora o meu professor usasse uma linguagem convincente e erudita.

O simples facto de os corpos que consideramos rígidos se comportarem diferentemente segundo a física clássica e segundo a teoria da relatividade restrita não era compreendido pelo velho professor, e eu não me atrevia a explicar-lho. Foi atacado de forma brutal por outro professor, chamado Banachiewicz, também famoso matemático e àstrónomo. Este afirmou que Zaremba era cego e os seus argumentos idiotas. O que aconteceu na Universidade da pequena cidade de Cracóvia é interessante ùnicamente porque o mesmo acontecia em todo o mundo. Conferências populares sobre a teoria da relatividade atraíam grandes multidões e um público perplexo ouvia os argumentos a favor e contra. Até mesmo Einstein fez conferências públicas sobre a teoria da relatividade. Não era hábil na divulgação da sua doutrina, mas o público ficava encantado por ver Einstein e ouvir a sua bela voz. Durante uma das suas conferências ele brincava com uma vara que estava sobre a mesa. Uma senhora perguntou a outra: «Porque não deixa ele a vara sossegada?». Mas depressa viu a explicação. Quando Einstein mostrou por meio de gestos como uma vara se move e contrai, a senhora, aliviada, cochichou à sua vizinha: «Não sabia que aquela era a vara que se contraía».

Eu próprio estava pronto e desejoso de tomar parte nestas discussões e sofria quando não era convidado a fazê-lo. Um ano mais tarde, em 1922, fui professor num liceu duma pequena cidade da Polónia. A excitação acerca da teoria da relatividade também ali chegara e tive a honra rara de ser o único homem que nessa cidade sabia alguma coisa sobre a teoria da relatividade. Pronunciei uma série de quatro conferências, e muitas pessoas tiveram de ir-se embora por não haver mais lugares na sala. Mais tarde

um amigo disse-me por graça: «Eu preferiria ouvir Einstein falar de Infeld».

Pouco a pouco diminuíram os argumentos contra a teoria da relatividade. Hoje em dia não existe físico que duvide de que os princípios das teorias da relatividade restrita e generalizada são superiores aos da física clássica. Talvez duvide de que a revolução tivesse sido suficientemente radical, mas ninguém, no seu juízo normal, acredita ser possível um regresso à física clássica. Mesmo mais tarde, no tempo de Hitler, trabalhos sobre a teoria da relatividade eram ainda publicados na Alemanha. Isto era permitido na medida em que o nome do criador da teoria da relatividade fosse omitido.

Mesmo que compreendamos a fama súbita e crescente de Einstein, já não é tão fácil perceber a razão de ela continuar ainda inalterável. Há várias razões para isso. Creio que uma delas está em que alguns professores que o combateram severamente o fizeram em próprio benefício. Outra razão está na vitalidade de Einstein. Sente-se isso quando se olha para qualquer dos seus retratos. Se Einstein entrasse numa sala para uma reunião e fosse apresentado como o Sr. Einstein de quem nada se sabia, ficava-se fascinado pelo brilho dos seus olhos, pela sua timidez e gentileza, pelo seu admirável bom humor, pela capacidade de transformar banalidades em sabedoria e por tudo quanto dizia ser o resultado do seu pensamento, que não era influenciado pelo ambiente. Sentíamos que tínhamos defronte de nós um homem que pensava por si. Influenciou milhões de pessoas, mas não foi influenciado por ninguém. Se quisermos ter uma imagem completa da influência de Einstein no mundo, não devemos esquecer a sua influência como homem.

Ele próprio descrevia a sua posição desta forma:

> O meu apaixonado interesse pela justiça social e pela responsabilidade social tem estado sempre em curioso contraste com a nítida falta de vontade de relações directas com homens e mulheres. Sou um cavalo para arreio simples, não sirvo para emparelhar ou trabalhar em conjunto. Nunca pertenci inteiramente a qualquer país ou Estado, ao círculo dos meus amigos, ou mesmo à minha própria família. Estas relações foram sempre acompanhadas de uma vaga indiferença, e o desejo de me contentar comigo mesmo aumentou com os anos.
>
> Semelhante isolamento é por vezes amargo, mas não lamento ter sido segregado da compreensão e simpatia dos outros homens. Perdi, sem dúvida, alguma coisa com isso, mas fui compensado ao tornar-me independente dos hábitos, opiniões e preocupações dos outros e não cair na tentação de assentar a minha paz de espírito em alicerces vacilantes *(The World As I See It).*

Deste modo, o cenário exterior da vida de Einstein é de pequena importância.

Durante e depois da primeira guerra mundial viu-se Einstein entrar no campo da política e trabalhar a favor da paz. Desde então não pertenceu a nenhum partido. Sente desprezo pela violência, pelo terror, pela agressão, pela injustiça. «Desprezo» deve ser a designação correcta; seria falso usar, em vez dela, a palavra «ódio». Ele foi sempre bondoso e, por virtude da forte acção exercida pelo mundo exterior, aprendeu a analisar os impulsos de estar interessado e de ocultar o seu desinteresse interior.

O seu aspecto ajudava. Ao falarmos com Einstein, podíamos ficar surpreendidos com a sua admirável figura de grande artista ou profeta, com o fulgor dos seus olhos. É que esse brilho estava concentrado no mundo e nas leis que o regem, e não em qualquer dos nossos problemas pessoais. Todavia, era alegre-

mente, com um dito espirituoso e uma gargalhada sonora, que assinava uma carta de recomendação, na medida em que não tivesse uma prova definitiva de que o interessado fosse um burlão ou um incompetente. Acreditava no que lhe dissessem porque era bom, porque desejava ser bom e porque é muito mais simples acreditar do que desconfiar. Pensar-se-á que era fácil convencer Einstein de qualquer coisa, mas ele tornava-se obstinado e rígido se soubesse que falava com um fascista. E tornava-se desconfiado se lhe apresentassem um projecto que parecesse beneficiá-lo só a ele.

Em 1914 recusou-se a assinar o manifesto dos cientistas alemães. Depois da primeira guerra mundial foi o primeiro cientista alemão convidado a ir a' França.

Após a guerra foi durante muitos anos presidente da Liga Alemã dos Direitos do Homem. Até ao fim da sua vida levantou sempre, incansàvelmente, a voz em protesto contra desumanidades e injustiças e apoiou pùblicamente a campanha contra a «lei de Linch», que era aplicada com aspecto de legalidade aos negros americanos.

A influência das investigações de Einstein faz-se hoje sentir profundamente, duma forma material, na evolução do mundo e tem levantado questões sérias de natureza política e moral. A história da evolução da energia atómica começa com a correspondência entre a igualdade dos valores de massa e de energia estabelecida por Einstein. Einstein foi também, depois da descoberta da cisão do urânio, um dos primeiros a verem as fantásticas possibilidades da energia atómica e o perigo do seu uso. Numa carta escrita em 1939 ao presidente Roosevelt afirmou «que o elemento urânio pode ser transformado, num futuro imediato, numa fonte nova e potente

de energia», e chamou a atenção do perigo para todo o mundo de uma bomba atómica nas mãos de Hitler: «Uma só bomba deste tipo, transportada num barco e explodindo num porto, pode bem destruir todo esse porto e a região em volta».

Combateu até ao fim da vida, incansàvelmente, contra o perigo do abuso da energia atómica para fins militares e pela conservação justa da paz mundial. No fim da segunda guerra mundial, numa mensagem ao povo americano, disse:

> É a nós, cientistas, que desencadeámos esta força prodigiosa, que compete dar a justificação dominante, transformando a energia atómica de tal maneira que fique ao serviço do bem da humanidade, e não do seu aniquilamento.

Nos dias sombrios que correm [1], em que os ares estão cheios de vãs banalidades, de argumentos tolos, de histórias mesquinhas, é refrescante ouvir uma voz clara que fala à razão. É a voz da sabedoria que nos diz:

> A ciência fez nascer este perigo, mas o verdadeiro problema está no cérebro e no coração do homem. Não modificaremos o coração dos outros homens por meio de mecanismos, mas sim modificando os *nossos* corações e falando corajosamente.
>
> Devemos ser generosos, dando ao mundo o conhecimento que possuímos das forças da natureza, depois de estabelecermos medidas contra o seu abuso.
>
> Devemos mostrar, não uma mera boa vontade, mas uma determinação activa em nos submetermos a uma autoridade obrigatória necessária à segurança do mundo.

---

[1] Recordamos novamente que este livro foi escrito antes da morte de Einstein. (N. E.)

Devemos saber que não podemos fazer ao mesmo tempo planos para a guerra e para a paz.

Quando o nosso coração e o nosso espírito estiverem libertos, só então encontraremos coragem para vencer o medo que avassala o mundo *(Only Then Shall We Find Courage)*.

Nos seus esforços constantes para a compreensão mútua dos povos e para a conservação da paz mundial Einstein dá plena conta das forças que lutam contra estes esforços. Numa carta a Sigmund Freud, de 30 de Julho de 1932, escreveu o seguinte a respeito das forças provocadoras da guerra: «... algumas destas forças aparecem hoje em dia abertamente. A necessidade de poder das actuais camadas dominantes de um Estado opõe-se a uma restrição dos seus direitos soberanos. Esta necessidade de poder alimenta-se muitas vezes de ambição material e económica de poder de outra camada. Penso aqui principalmente naqueles grupos, pequenos mas decididos, de homens que surgem em cada povo e que não possuem considerações e complexos sociais; para eles, guerra, produção de armas e comércio é apenas uma oportunidade para alcançarem vantagens pessoais e aumentarem o seu poder pessoal».

Einstein considera o sistema capitalista responsável pela presente crise da sociedade, porque para ele o principal parece serem as relações do indivíduo com a sociedade. Einstein considera um grande mal a chamada paralisia das consciências corrompidas pelo capitalismo. Ele próprio afirma:

... há um único remédio contra esse mal, ou seja, a construção da economia sobre fundamentos socialistas e a educação e preparação do povo para tal. Numa economia como esta os meios de produção são propriedade da sociedade e serão usados por ela por meio de planos bem elaborados. A produção será orga-

nizada de acordo com a necessidade e o trabalho dividido por todos os que são capazes de trabalhar, de forma que cada homem, cada mulher e cada criança tenham assegurados os meios de subsistência. O dever da educação será desenvolver, juntamente com as capacidades naturais, o sentido da responsabilidade dos indivíduos perante os outros seres humanos, em vez da actual luta pelo poder e pelo progresso (*Monthly Review*, 1950).

Albert Einstein nasceu em Ulm, Alemanha, a 14 de Março de 1879, nove anos depois da vitória de Bismark sobre a França, nove anos depois da Comuna de Paris. Experimentou duas vezes o aparecimento do imperalismo alemão e duas vezes a sua derrota. Foi uma criança tímida e pouco amiga de companhias, não mostrando qualquer talento especial. Aprendeu muito tarde a falar. Nunca teve grande aptidão para línguas; escreveu sempre em alemão. Os seus colegas alcunharam-no de *Biedermeier*, por ser lento e amigo de comodidade. Parece ter começado cedo a observar, entusiasmado, os fenómenos da natureza. Gostava de falar da grande impressão que lhe causara uma agulha magnética que o pai lhe dera aos 5 anos. As suas notas foram apenas medianas enquanto frequentou em Munique, onde viviam seus pais, o Liceu Luitpold. Estimulado por vários factores, principalmente por seu tio Jacob Einstein, começou a receber lições de matemática fora do liceu e sentia grande prazer na resolução de problemas de álgebra. Foi nesta época também que, sob a influência de sua mãe, apreciadora de música, começou a receber lições de violino. O seu violino acompanhou-o durante toda a vida. Está de acordo com o seu carácter a preferência pela música de câmara clássica, por Bach e por Mozart.

Aos 15 anos seus pais mudaram-se para Milão. Aproveitou esta oportunidade para passear durante

alguns meses pela Itália do Norte e do Centro e colher impressões da natureza e dos homens. Foi nesta altura que resolveu ser professor. No exame de admissão à Politécnica de Zurique brilhou principalmente em Matemática e Física, mas era fraco o seu conhecimento de Ciências Naturais e línguas; por isso teve de frequentar o Liceu em Aarau, para se preparar para o exame de admissão à faculdade. Foi em Aarau que pela primeira vez se interessou pelo problema, cuja solução revolucionou mais tarde a nossa concepção do mundo.

Durante os seus estudos na Escola Politécnica de Zurique surgiram as características fundamentais do seu trabalho posterior, principalmente a independência; foi mais por estudo pessoal do que por assistir às aulas que aumentou a sua sabedoria; foram as obras de Boltzmann que mais o influenciaram. Acabados os estudos, teve a princípio dificuldade em encontrar uma colocação. Alguém lhe deu esperanças de encontrar num sítio ou noutro um lugar como assistente, mas nenhuma das suas esperanças se concretizou. Era um apátrida desde os tempos em que seus pais se tinham mudado para Milão. Este facto, bem como o de ser judeu, não eram boas recomendações para o jovem. Por isso teve de se contentar com um lugar pobre de preceptor em Schaffhausen e Berna até que recebeu a cidadania de Zurique, conseguindo em 1902, mercê de uma recomendação do seu amigo Marcel Grossmann, um lugar de preparador na Repartição Federal de Registo de Patentes, em Berna. Esteve aí durante sete anos. Não pretendia ser um funcionário exemplar; mas parece que os seus chefes davam maior importância ao seu valor científico do que às suas habilidades burocráticas. Einstein tinha sempre tempo para continuar na Universidade de Berna o estudo da Física; em 1905, quase na mesma altura em

que apareceram os seus trabalhos nos *Annalen der Physik*, doutorou-se. Tinha-se casado em 1903 com uma colega eslava. Este casamento, de que houve dois filhos, terminou mais tarde num divórcio.

Einstein quis concorrer ao lugar de professor da Universidade de Berna. A princípio não conseguiu; o seu valor era ainda desconhecido e não havia lugar para o jovem funcionário sem protectores. Um pouco antes do convite para ser professor agregado da Universidade de Zurique obteve autorização para ensinar. Entretanto o mundo científico conheceu-o. Foi auxiliado principalmente por Henri Poincaré e Madame Curie. A sua fama continuava a aumentar. Depois de alguns anos como professor em Praga, foi, de 1911 a 1913, professor na Escola Politécnica de Zurique. Na Primavera de 1914 foi convidado, como membro da Academia Científica Prussiana, para professor livre da Universidade de Berlim. Casou ali com a sua prima Else. Einstein trabalhou em Berlim até 1933. Quando Hitler subiu ao poder, Einstein encontrava-se na Bélgica. Os seus livros foram queimados pùblicamente por Goebbels, por ser considerado judeu, bolchevista e pacifista. Emigrou para os Estados Unidos, onde foi professor no Instituto de Estudos Avançados de Princeton. Em 1945 reformou-se, prosseguindo, no entanto, os seus estudos científicos e continuando a interessar-se pelas questões públicas. Faleceu em Princeton em 1955.

Vemos por vezes, em jornais ilustrados de actualidades, o retrato de um homem de cabelos brancos, vestido com simplicidade e até pobremente; seus olhos parecem longe das coisas pequenas deste mundo, como que observando as estrelas.

Einstein não trabalhou para proveito próprio. Preocupava-se pouco com as coisas que parecem tão importantes na nossa vida particular. Se se dedicava a uma ideia, não o fazia para fama pessoal.

Talvez que a verdadeira grandeza de Einstein esteja no simples facto de, apesar de durante toda a sua vida ter observado as estrelas, ter sempre procurado olhar para a humanidade com bondade e compaixão.

BIBLIOGRAFIA

Existe uma extensa literatura, em todos os níveis possíveis, acerca da teoria da relatividade. Só mencionarei os livros que foram escritos, pelo menos parcialmente, por Einstein. Parece-me ser este o melhor método de selecção para este livro, de modo a evitar muitas páginas de bibliografia.

LIVROS N..O TÉCNICOS

Relativity, the Special and General Theory, por Albert Einstein, 138 págs., Nova Iorque (Holt), 1920.

Este é o livro popular de Einstein sobre a relatividade, mencionado no cap. I.

Sidelights on Relativity, por Albert Einstein, 56 págs., Londres (Methuen), 1922.

Contém as conferências «Éter e Relatividade» e «Geometria e Experiência».

The World As I See It, por Albert Einstein, 290 págs., Nova Iorque (Covici Friede), 1934.

Uma colecção de cartas, artigos e discursos sobre diferentes assuntos.

The Evolution of Physics, por Albert Einstein e Leopold Infeld, 313 págs., Nova Iorque (Simon and Schuster), 1938.

Out of My Later Years, por Albert Einstein, 282 págs., Nova Iorque (Philosophical Library), 1950.

Contém lições, artigos e conferências sobre vários assuntos escritos desde 1936.

LIVROS DUM NÍVEL MAIS TÉCNICO

The Meaning of Relativity, por Albert Einstein, 150 págs., Princeton (Princeton University Press), 1950.

Uma terceira edição das lições dadas por Einstein sobre a teoria da relatividade em 1921, com um apêndice sobre a sua nova teoria.

The Principle of Relativity, por Albert Einstein, 186 págs., Calcutta (University of Calcutta), 1920.

Contém reimpressões de trabalhos originais de Einstein e dos de Minkowski.

Albert Einstein: Philosopher-Scientist, editado por Paul Arthur Schlipp, 781 págs., «The Library of Living Philosophers» (vol. VII), Evanston, Illinois, 1949.

Este volume, dedicado a Einstein, contém um artigo seu, muitos ensaios acerca da obra de Einstein e respostas suas a críticas amigáveis.

PRINCIPAIS ACONTECIMENTOS NA VIDA DE EINSTEIN

1879	Nascimento em Ulm, Bavária (Alemanha).
1880-1894	Vive em Munique, onde frequenta o liceu.
1894	A família muda-se para Milão.
1896-1901	Estuda na Escola Politécnica de Zurique.
1901-1903	Torna-se cidadão suíço; trabalha na Repartição Federal de Registo de Patentes, em Berna. Primeiro casamento.
1905	Publicação dos trabalhos sobre a teoria quântica, a teoria da relatividade e o movimento browniano. É nomeado professor-assistente da Universidade de Berna.
1909	Professor-agregado da Universidade de Zurique.
1910	Professor de Física Teórica da Universidade Alemã de Praga.
1912	Professor de Física Teórica da Escola Politécnica de Zurique.
1913	Membro da Academia Prussiana. Muda-se para Berlim.
1916	O trabalho sobre a teoria da relatividade generalizada fica essencialmente terminado. Segundo casamento.
1919	Confirmação da teoria da relatividade generalizada pela observação da curvatura da luz no campo magnético do Sol.
1919-1932	Visita os Estados Unidos, a Inglaterra, a França, a China, o Japão, a Palestina e a Espanha. Recebe em 1922 o Prémio Nobel pela sua teoria dos efeitos fotoeléctricos.
1933	Retira-se da Academia Prussiana. Professor do Instituto de Estudos Avançados de Princeton, New Jersey.
1945	Reforma oficial.
1949	Teoria da gravitação.
1955	Falecimento em Princeton.

ÍNDICE

ADVERTÊNCIA AO LEITOR 7

CAPÍTULO I. VENCENDO PRECONCEITOS . . . 9

CAPÍTULO II. O MUNDO FÍSICO ANTES DE EINSTEIN 17

A origem da teoria do éter 17
O fracasso do conceito de éter 25

CAPÍTULO III. A PRIMEIRA REVOLUÇÃO EINSTEINIANA 36

Um e dois, mas não três 36
O relógio em movimento 40
Galileu e Lorentz 46
Um princípio em vez de dois 53
«Um paradoxo? Um paradoxo! Um paradoxo verdadeiramente genial!» . . . 59

CAPÍTULO IV. A SEGUNDA REVOLUÇÃO EINSTEINIANA 66

O elevador caindo 66
Três temas 79
O universo 101

CAPÍTULO V. A PARTE DE EINSTEIN NA GRANDE REVOLUÇÃO INACABADA 119

O nascimento da teoria quântica 119
Quanta 131
Fotões 139

CAPITULO VI. PARA ALÉM DAS REVOLUÇÕES? 152
Em busca da unidade 152
Os dois pecados 160
No fim da busca 162
Einstein, o homem e o filósofo 164

BIBLIOGRAFIA 183

PRÍNCIPAIS ACONTECIMENTOS DA VIDA DE EINSTEIN 185

Colecção SABER, série especial N.º 4 SE

VIEIRA DE ALMEIDA

INICIAÇÃO LÓGICA

SUMÁRIO: Lógica - Linguagem - Análise Lógica; Cálculo Proposicional; Cálculo de Classes; Algebra Lógica.

Uma introdução à Lógica moderna especialmente indicada para os estudantes das Faculdades de Letras e dos últimos anos do Curso Liceal.

Um volume da Série Especial 25$00

À venda nas grandes Livrarias de Portugal e do Brasil

N.º 33 da Colecção SABER

LEON BLOCH

LUTAS SOCIAIS NA ROMA ANTIGA

SUMÁRIO:

Condições fundamentais do desenvolvimento social; origem das classes. Luta de classes entre Patrícios e Plebeus. Progressos da Plebe. A Equiparação de Patrícios e Plebeus. Origem e desenvolvimento das novas diferenças sociais. Roma, grande potência. Consequências sociais desta transformação. Advento de novas aristocracias. O Proletariado. A guerra social no último século do regime republicano. Intentos da reforma agrária. Primeira tentativa de solução monárquica. A Constituição aristocrática e a sua abolição. Insurreição do proletariado rural.

Um volume de 218 páginas 15$00

À venda nas grandes Livrarias de Portugal e do Brasil

Uma extraordinária publicação em fascículos

A CIÊNCIA DO SÉCULO XX

por PIERRE ROUSSEAU

Uma obra que oferece ao leitor um panorama da ciência na época de viragem do século XIX para o século XX, e partindo das fantasias de Júlio Verne, nos conduz aos laboratórios e aos gabinetes de trabalho donde sairam as espantosas realizações da nossa época: a electricidade e a electrónica; a T S.F.; a televisão; as telecomunicações; o cinema; a célula fotoeléctrica; a óptica electrónica; os autómatos; as máquinas de calcular; os cérebros electrónicos; a cibernética; o telecomando; o radar; a aerodinâmica; os foguetões cósmicos; a energia atómica.

Esta obra estuda a ciência actual, enumera as suas aplicações e dá um balanço das suas possibilidades técnicas. Não é uma história da ciência; é um estudo da maior actualidade: um inquérito às perspectivas que à Humanidade se oferecem nesta encruzilhada da História.

A obra fica concluída em 6 fascículos

Condições de assinatura:

Modalidade A:	Fascículo a fascículo	25$00
» B:	Série de 3 fascículos (pagamento adiantado).	65$00
» C:	Obra completa (6 fascículos) sem capa, (pagamento adiantado)	120$00

N. B. — Para as províncias ultramarinas só se aceitam assinaturas de séries de 3 ou 6 fascículos

Aceitam-se assinaturas, directamente, ou por intermédio de qualquer livraria

Este livro foi composto e
impresso nas oficinas da
Sociedade Progresso Industrial
em Lisboa, para
Publicações Europa-América
e acabou de se imprimir
em 8 de Março de 1957

Condições de venda da

Colecção SABER

Para os leitores fieis desta Colecção estabelecem-se condições especiais que muito beneficiam os assinantes já inscritos ou os que venham a inscrever-se.

ASSINATURAS (da série corrente):

Modalidade I — Série de 2 volumes: **25$00** (em vez de 30$00), sem outros encargos.

Modalidade II — Série de 6 volumes: **70$00** (em vez de 90$00), sem outros encargos.

As assinaturas são pagas adiantadamente: a cobrança faz-se contra a entrega do 1.º volume da série assinada.

1 — Os volumes da *Colecção SABER* que nos forem pedidos não são onerados com as despesas de porte e cobrança.

2 — Enviamos os volumes contra-reembolso para qualquer ponto do país.

Venda avulso da série corrente: 15$00

Os volumes da Série Especial têm preços variáveis

Enviamos o nosso catálogo geral de edições e distribuições a quem o solicitar

colecção SABER

VOLUMES PUBLICADOS

1 — *História das Técnicas*, por Pierre Ducassé

2 — *História do Cinema*, por Lo Duca

3 — *A Grafologia*, por Herbert Hertz

4 — *Os Sonhos*, por Jean Lhermitte

5 — *As Origens da Burguesia*, por Régine Pernoud

6 — *A Batalha dos Trusts*, por Henry Peyret

7 — *História da Literatura Portuguesa*, por António José Saraiva (3.ª edição)

8 — *Do Átomo à Estrela*, por Pierre Rousseau

9 — *História do Teatro*, por Robert Pignarre

10 — *As Grandes Correntes da Filosofia*, por Pierre Ducassé

11 — *Os Regimes Alimentares*, por P. Chêne

12 — *A Génese da Humanidade*, por C. Arambourg

13 — *As Étapas da Geografia*, por René Clozier

14 — *História da Velocidade*, por Pierre Rousseau

15 — *A Polícia Científica*, por Léon Lerich

16 — *As Grandes Doutrinas Económicas*, por Arthur Taylor

17 — *Pasteur e os Micróbios*, por Albert Delaunay

18 — *O Ocultismo Perante a Ciência*, por Marcel Boll

19 — *Contabilidade*, por Jean Fourastié

20 — *A Adolescência*, por Maurice Debesse

21 — *Fernão Lopes*, por António José Saraiva

22 — *A Vontade*, por Paul Foulquié

23 — *A Canção Popular Portuguesa*, por Fernando Lopes Graça

24 — *A Inteligência*, por Gaston Viaud

25 — *A Revolução Francesa*, por Paul Nicolle

26 — *A Hereditariedade Humana*, por Jean Rostand

27 — *A Arte de Pintar*, por Tristan Klingsor

28 — *Discursos Parlamentares*, por Almeida Garrett

29 — *A Origem das Espécies*, por Émile Guyénot

30 — *O Voo no Espaço Cósmico*, por A. Sternfeld

31 — *A Inquisição Portuguesa*, por António José Saraiva

32 — *O Mundo dos Ultra-Sons*, por V. Koudriavtsev

33 — *Lutas Sociais na Roma Antiga* por Leon Bloch

34 — *Albert Einstein*, por Leopold Infeld

Série Especial:

1 SE — *As Étapas da Matemática* por Marcel Boll

2 SE — *A Revolução Industrial*, por T. S. Ashton

3 SE — *Electricidade e Electrónica*, por Marcel Clicques

4 SE — *Iniciação Lógica*, por Vieira de Almeida

5 SE — *Nuno Gonçalves*, por Adriano de Gusmão

Preço de cada volume de Série Vulgar: Esc. 15$00

À venda em Portugal e no Brasil

Colecção SABER

ALBERT EINSTEIN

34